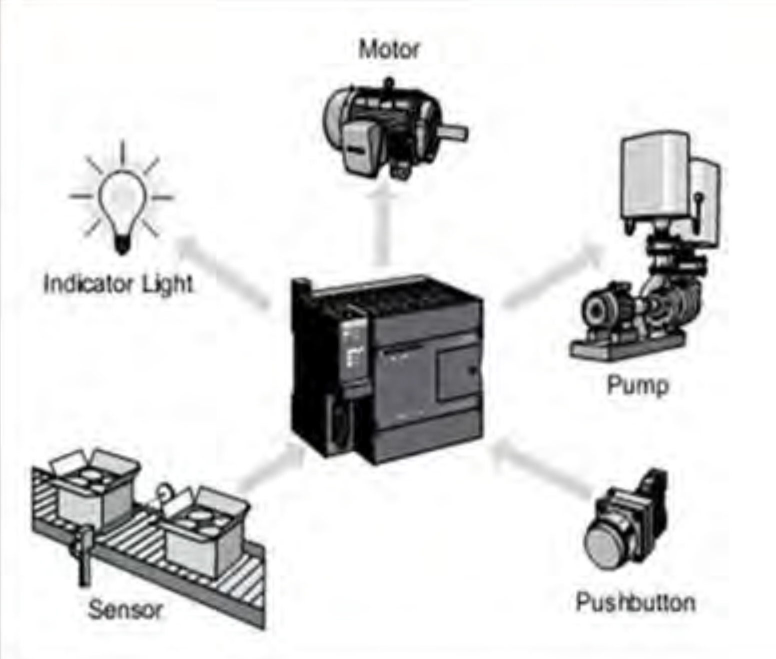
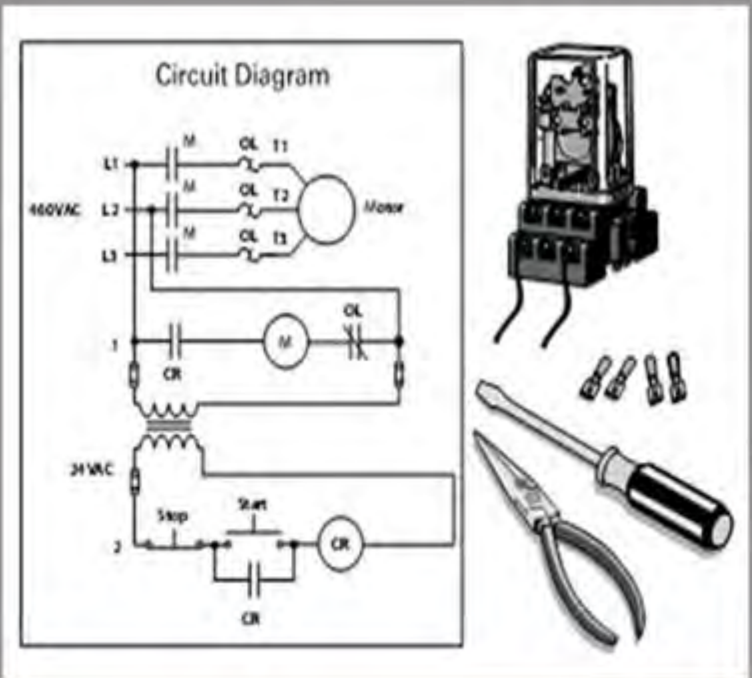
KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
REPUBLIK INDONESIA
2013

# Instalasi Motor Listrik

## Semester 6




Kelas

XII

## PENULIS

# KATA PENGANTAR

Kurikulum 2013 adalah kurikulum berbasis kompetensi. Di dalamnya dirumuskan secara terpadu kompetensi sikap, pengetahuan dan keterampilan yang harus dikuasai peserta didik serta rumusan proses pembelajaran dan penilaian yang diperlukan oleh peserta didik untuk mencapai kompetensi yang diinginkan.

Faktor pendukung terhadap keberhasilan Implementasi Kurikulum 2013 adalah ketersediaan Buku Siswa dan Buku Guru, sebagai bahan ajar dan sumber belajar yang ditulis dengan mengacu pada Kurikulum 2013. Buku Siswa ini dirancang dengan menggunakan proses pembelajaran yang sesuai untuk mencapai kompetensi yang telah dirumuskan dan diukur dengan proses penilaian yang sesuai.

Sejalan dengan itu, kompetensi keterampilan yang diharapkan dari seorang lulusan SMK adalah kemampuan pikir dan tindak yang efektif dan kreatif dalam ranah abstrak dan konkret. Kompetensi itu dirancang untuk dicapai melalui proses pembelajaran berbasis penemuan (*discovery learning*) melalui kegiatan-kegiatan berbentuk tugas (*project based learning*), dan penyelesaian masalah (*problem solving based learning*) yang mencakup proses mengamati, menanya, mengumpulkan informasi, mengasosiasi, dan mengomunikasikan. Khusus untuk SMK ditambah dengan kemampuan mencipta .

Sebagaimana lazimnya buku teks pembelajaran yang mengacu pada kurikulum berbasis kompetensi, buku ini memuat rencana pembelajaran berbasis aktivitas. Buku ini memuat urutan pembelajaran yang dinyatakan dalam kegiatan-kegiatan yang harus **dilakukan** peserta didik. Buku ini mengarahkan hal-hal yang harus **dilakukan** peserta didik bersama guru dan teman sekelasnya untuk mencapai kompetensi tertentu; bukan buku yang materinya hanya dibaca, diisi, atau dihafal.

Buku ini merupakan penjabaran hal-hal yang harus dilakukan peserta didik untuk mencapai kompetensi yang diharapkan. Sesuai dengan pendekatan kurikulum 2013, peserta didik diajak berani untuk mencari sumber belajar lain yang tersedia dan terbentang luas di sekitarnya. Buku ini merupakan edisi ke-1. Oleh sebab itu buku ini perlu terus menerus dilakukan perbaikan dan penyempurnaan.

Kritik, saran, dan masukan untuk perbaikan dan penyempurnaan pada edisi berikutnya sangat kami harapkan; sekaligus, akan terus memperkaya kualitas penyajian buku ajar ini. Atas kontribusi itu, kami ucapkan terima kasih. Tak lupa kami mengucapkan terima kasih kepada kontributor naskah, editor isi, dan editor bahasa atas kerjasamanya. Mudah-mudahan, kita dapat memberikan yang terbaik bagi kemajuan dunia pendidikan menengah kejuruan dalam rangka mempersiapkan generasi seratus tahun Indonesia Merdeka (2045).

Jakarta, Januari 2014

Direktur Pembinaan SMK

Drs. M. Mustaghfirin Amin, MBA

# DAFTAR ISI

# BAB I

# PENDAHULUAN

## A. Latar Belakang

Pada hakekatnya desain atau perancangan instalasi motor listrik terletak pada ketepatan menganalisa spesifikasi yang direkomendasi oleh otoritas yang bersangkutan. Dalam hal ini peralatan yang digunakan untuk instalasi motor listrik yang diaplikasikan pada Instalasi motor listrik di industri.

## B. Deskripsi Singkat

Bahan ajar ini secara umum berguna membekali dan meningkatkan kemampuan kompetensi melalui kajian baik teori maupun praktek pada aspek instalasi motor listrik sesuai standar kompetensi kejuruan.

## C. Manfaat Bahan Ajar Bagi Siswa

Bahan ajar ini diharapkan bermanfaat bagi para siswa untuk membekali pengetahuan tentang Instalasi motor listrik serta dapat menerapkannya dalam lingkup materi Instalasi motor listrik di Industri.

## D. Tujuan Pembelajaran

### 1. Tujuan Pembelajaran Umum

Setelah selesai pembelajaran siswa diharapkan mampu :

- Mengimplementasikan pemasangan komponen dan sirkit instalasi motor listrik.
- Menggabungkan pemasangan komponen dan sirkit instalasi motor listrik.
- Merancang pemasangan komponen dan sirkit instalasi motor listrik.
- Mengkordinasikan pemasangan komponen dan sirkit instalasi motor listrik.

### 2. Tujuan Pembelajaran Khusus

Setelah selesai pembelajaran peserta diharapkan mampu:

a. Memahami dasar-dasar VFD.
b. Memahami dasar-dasar converter.
c. Memahami dasar-dasar inverter
d. Memahami pedoman-pedoman instalasi, komissioning, dan *troubleshooting*.
e. Mengoperasikan fungsi-fungsi dasar VFD
f. Memasang instalasi motor listrik dengan VFD.

## E. Materi Pokok dan sub Materi

a. Dasar-dasar VFD.
b. Komponen Elektronika Daya.
c. Kelistrikan VFD.
d. Penyearah Elektronika Daya (Konverter AC/DC).
e. Inverter Gate-Commutated (Konverter DC/AC).
f. Proteksi dan Diagnosa.
g. Penginstalan dan Komisioning.
h. Hubungan Sumber Daya dan Persyaratan Pembumuan.
i. Pencegahan untuk Kontrol Start/Stop Pengendali AC.
j. Pengawatan Kontrol dan Komisioning untuk VFD.
k. Pengoperasian VFD.

## F. Petunjuk Belajar

Pertama-tama bacalah semua materi yang ada, bila ada hal-hal yang kurang jelas tanyakan kepada guru yang bersangkutan atau dibahas bersama-sama dengan siswa yang lain. Selanjutnya cobalah mengamati, menanya, mencari informasi dan mengasosiasikan serta mengkomunikasikan dengan mengerjakan latihan yang ada. Akhirnya implementasikan pada pelaksanaan proses pembelajaran.

# BAB II

## DASAR-DASAR VFD

***Indikator Keberhasilan:*** *Setelah mengikuti pembelajaran ini siswa diharapkan dapat memahami dasar-dasar VFD.*

### 2.1 Kebutuhan untuk VFDs

Motor berkecepatan tetap dan motor dua kecepatan telah dibahas dalam bab-bab sebelumnya. Berbagai aplikasi industri memerlukan kontrol gerak mesin dengan bantuan motor-motor seperti itu. VFD memberi batasan kontrol kontinu atas kecepatan mesin.

Beberapa aplikasi, seperti pabrik kertas, *rolling mill*, pompa, dan alat-alat mesin tidak dapat berjalan tanpa VFD ini sedangkan yang lainnya, seperti pompa sentrifugal, bisa mendapat manfaat dari penghematan energi. Umumnya VFD digunakan untuk melakukan berikut ini:

- Menyesuaikan kecepatan pengendali dengan keperluan kecepatan proses
- Menyesuaikan torque (kopel/torsi) pengendali dengan keperluan kopel proses
- Menghemat energi dan meningkatkan efisiensi.

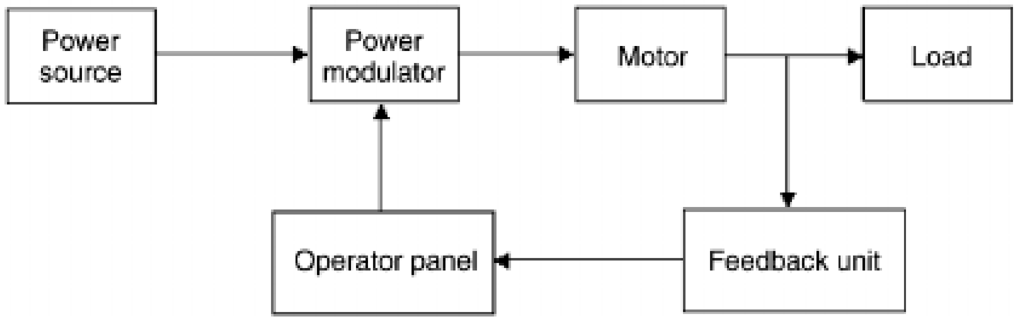
### 2.2 VFD Dasar

VFD elektrik dasar terdiri dari sebuah motor, unit kontrol pengendali, unit sensor, dan sebuah input operator.

Diagram blok dasar dari sebuah pengendali elektrik berkecepatan variabel ditunjukkan dalam Gambar 2.1.

Unit kontrol pengendali adalah sebuah perangkat yang memodulasi energi dari sumber ke motor . Melalui panel operator, seseorang dapat meningkatkan atau menurunkan *set point* drive. Sebuah unit umpan balik memberi umpan balik kecepatan aktual pada pengendali. Kemudian modulator daya atau unit kontrol pengendali yang mengontrol kecepatan, kopel, dan daya, bersama dengan arah motor dan mesin. Modulator daya

bisa digunakan sebagai satu alat, untuk pengontrolan motor. Ini me-mungkin harus digunakan dalam tipe gabungan untuk tipe-tipe aplikasi lain tertentu. Berikut ini adalah tipe-tipe modulator konverter bersama dengan uraian singkat dari masing-masing.



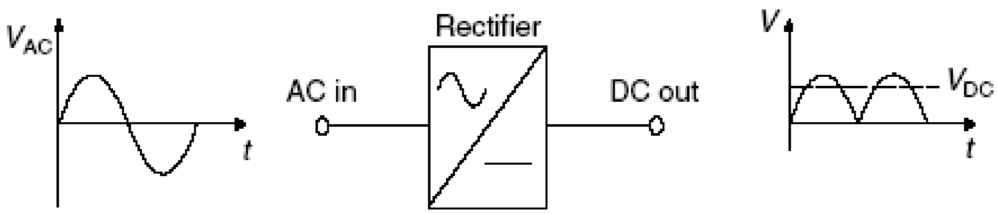

Gambar 2.1 *Diagram blok VFD*

### 2.2.1 Konverter

Ini mengkonversi satu bentuk energi ke bentuk lainnya, yang cocok untuk sebuah motor. Mereka dapat didefinisikan sebagai perakitan komponen-komponen elektronika daya, yang mengkonversi satu atau lebih karakteristik dari sebuah sistem tenaga listrik.

Untuk pengontrolan motor DC, tegangan DC variabel diperlukan. Untuk motor AC, sebuah frekuensi tetap, tegangan AC variabel, atau sebuah frekuensi variabel diperlukan. Untuk memenuhi persyaratan itu, alat-alat berikut digunakan. Di bawah ini diberi berbagai tipe konverter dan kombinasinya:

#### *1) Konverter AC ke DC*




Gambar 2-2. Konverter AC ke DC.

Ini dikelompokkan sebagai:

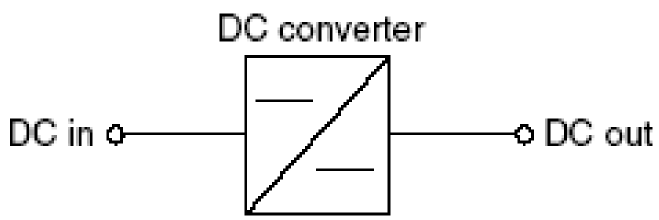
- penyearah tak terkontrol
- penyearah setengah gelombang
- penyearah gelombang penuh
- penyearah dengan *self-commuted devices*.

Dalam sebuah penyearah tak terkontrol, tegangan DC konstan pada output berbeda dari suplai AC pada input. Dalam sebuah penyearah setengah gelombang, tegangan DC  ariable pada output dengan arus dan tegangan positif dinamakan drive kuadran satu (*single quadrant drive*). Dengan penyearah gelombang penuh, tegangan DC berpolaritas positif/variable dan arus dalam arah positif dinamakan drive kuadran dua (*double quadrant drive*). Penyearah gelombang penuh mempunyai alat-alat komutasi seperti GTO (gate turn-off thyristors) dan power transistor. Ini merupakan suatu pengendali  kuadran satu atau pengendali kuadran dua.

Jika digunakan dengan sebuah penyearah gelombang penuh, dapat bervariasi empat fungsionalitas kuadran, yakni, tegangan dan juga arus dalam kedua arah.

### *2) Konverter DC ke DC*

Juga dikenal sebagai *choppers*, ini memungkinkan tegangan DC variable pada output, dari tegangan DC tetap yang diberi pada input.

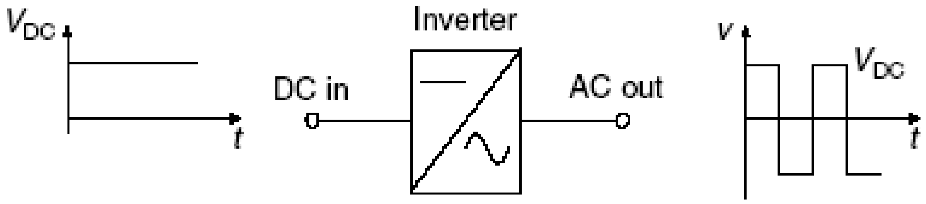



Gambar 2-3. Konverter DC ke DC.

*Chopper* menggunakan alat-alat seperti GTOs, *thyristors, power* MOSFETs, dan IGBTs (*insulated gate bipolar transistor*).

### 3) Konverter atau Inverter DC ke AC

Penggunaan inverter untuk menjamin tegangan AC berfrekuensi variabel pada output dari tegangan DC tetap yang diberi pada inputnya.



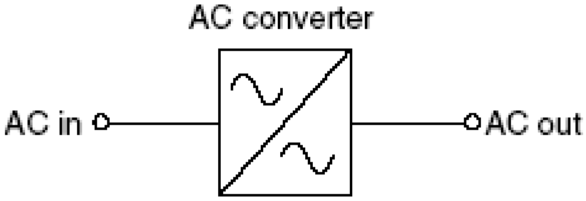

Gambar 2-4. Inverter DC ke AC.

Ini adalah jenis sumber tegangan atau jenis sumber arus. Arus atau tegangan output dapat diubah bersama dengan frekuensi melalui tegangan input DC yang bervariasi. Ini terjadi dengan memberi tegangan DC ke inverter melalui sebuah penyearah. Tegangan variabel, frekuensi AC variabel bisa diperoleh dengan menggunakan PWM (*pulse width modulation*) untuk pengontrolan inverter.

### 4) Cycloconverter

Penggunaan *cycloconverter* untuk menjamin sebuah tegangan variabel, tegangan AC berfrekuensi variabel pada output dari sebuah tegangan tetap, dan frekuensi tegangan AC yang diberi pada input.

Ini dibangun dengan menggunakan thyristors, yang sudut konduknya dikontrol dengan sebuah unit kontrol.




Gambar 2-5. *Cycloconverter*

Bagian berikut merinci berbagai komponen dasar elektronika daya. Komponen-komponen ini merupakan satu bagian dasar dari semua sirkuit.

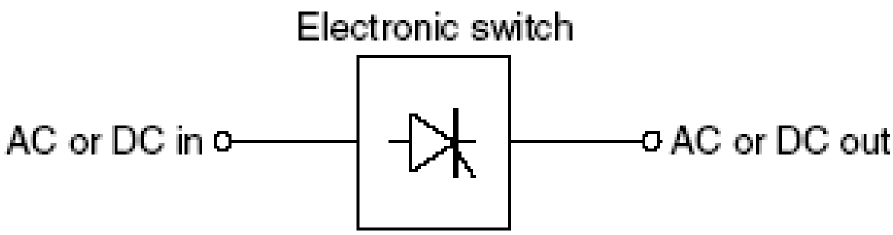
## BAB III

# KOMPONEN-KOMPONEN ELEKTRONIKA DAYA

***Indikator Keberhasilan:*** *Setelah mengikuti pembelajaran ini siswa diharapkan dapat memahami karakteristik dan prinsip kerja komponen-komponen elektronika daya dengan benar sesuai spesifikasi.*

Komponen-komponen elektronika daya adalah alat-alat semikonduktor, seperti dioda, thyristors, transistors, dan sebagainya yang digunakan dalam rangkaian daya (*power circuit*) dari sebuah konverter. Dalam elektronika daya, mereka digunakan dalam mode *switching non-linier* (mode on/off) dan bukan sebagai amplifier linier. Dengan kata lain, alat-alat ini berprilaku seperti sebuah saklar (*switch*) elektronik.

Sebuah saklar elektronik menghubungkan atau memutuskan secara elektronik sebuah sirkuit AC atau DC dan biasanya bisa di-switch ON dan/atau OFF. Konduksi biasanya dibolehkan dalam satu arah saja.




Gambar 3-1. Simbol saklar elektronik.

Komponen-komponen berikut adalah alat-alat yang umumnya digunakan sebagai saklar elektronik dalam konverter elektronika daya. Perkembangan dalam teknologi semikonduktor telah membuat komponen-komponen elektronika daya ini lebih kecil, lebih handal, lebih efisien (rugi-rugi lebih rendah), lebih murah, dan mampu beroperasi pada tegangan, arus, dan frekuensi yang jauh lebih tinggi. Prinsip-prinsip operasi ideal dari komponen-komponen ini bisa digambarkan dalam ekspressi matematik sederhana.

- Dioda
- Thyristor
- GTO
- MOS-controlled thyristor (MCT)
- Bipolar junction transistors (BJT) power
- Field effect transistors (FET, MOSFET)
- Insulated gate bipolar transistor (IGBT)
- Resistors (resistansi)
- Reactors or chockes (induktansi)
- Kapasitor (kapasitansi).

### 3.1 Dioda

Dioda adalah saklar on/off power semikonduktor yang memungkinkan aliran arus dalam satu arah, bergantung pada sambungannya adalah alat semikonduktor dua terminal.

Kedua terminal dari sebuah dioda dinamakan anoda (A) dan katoda (K). nama-nama ini diperoleh dari saat-saat ketika katup-katup umumnya digunakan.

Menurut konstruksinya mempunyai sebuah persambungan (*junction*) P-N. Terdiri dari sebuah layer (*wafer*) silikon dua lapis yang dipasang pada dasar tembaga substansial. Dasar tersebut bertindak sebagai *heat sink*, suatu dukungan untuk penyangga (*enclosure)* dan salah satu terminal elektrik dioda. Permukaan lainnya dari layer (*wafer)* disambungkan ke terminal elektrik lainnya. *Enclosure* menutup *wafer* silikon dari atmosfer dan memberi isolasi yang memadai di antara kedua terminal dioda.




Gambar 3-2. Simbol dioda.

**Dioda Ideal :**

- *Forward conduction*: lebih sedikit resistansi
- *Reverse blocking*: lebih sedikit kerugian (tidak ada arus bocor)
- *switch on/off time*: Sesaat

Ini merupakan *forward-biased* (arah maju), bila anoda positif, relatif pada katoda dan dioda mengkonduksi arus, yakni, saklar tertutup. *Reverse-biased* (arah mundur), bila anoda negatif, relatif pada katoda dan aliran arus dihambat, yakni, saklar terbuka. Kemampuan dioda ini, untuk menghambat aliran arus dalam satu arah, membuatnya cocok untuk aplikasi penyearah, di mana diperlukan untuk membiarkan aliran arus dalam satu arah saja.

Tergantung pada keperluan suatu aplikasi, tipe-tipe dioda berikut tersedia:

*Dioda Schottky.* Dioda-dioda ini digunakan bilamana penurunan tegangan forward rendah, biasanya 0,4 V, dibutuhkan untuk sirkuit tegangan output rendah. Dioda-dioda ini mempunyai kapabilitas tegangan penghambatan terbatas 50-100 V.

*Dioda recovery cepat (Fast recovery diodes).* Dioda-dioda ini didesain untuk digunakan dalam sirkuit di mana waktu-waktu recovery cepat diperlukan, misalnya, dalam kombinasi dengan saklar-saklar terkontrol dalam sirkuit-sirkuit berfrekuensi tinggi. Dioda-dioda seperti itu mempunyai waktu recovery ($t_{RR}$) kurang dari beberapa microsecond.

*Line-frekuency diodes.* Tegangan on-state dioda-dioda ini didesain serendah mungkin untuk menjamin bahwa mereka switch on secara cepat dalam aplikasi-aplikasi *bridge rectifier*. Sayangnya, waktu recovery ($t_{RR}$) panjang, tetapi ini layak untuk aplikasi penyearah *line*-frekuensi. Dioda-dioda ini tersedia dengan rating tegangan blocking beberapa kV dan rating arus beberapa ratus kA. Selain itu, mereka dapat disambungkan secara seri atau secara paralel untuk memenuhi keperluan arus atau tegangan tinggi.

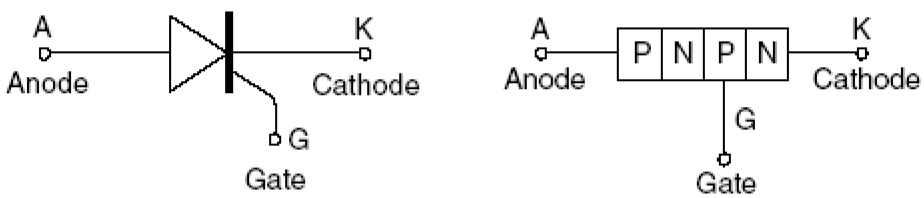
### 3.2 Thyristor

Thyristor kadang-kadang disebut sebagai SCR (*silicon-controlled rectifiers*). Ini adalah nama yang awalnya diberikan pada piranti ini ketika ditemukan oleh *General Electric (USA)* sekitar tahun 1957. Tetapi nama ini tidak pernah diterima dan digunakan secara universal.

Nama *thyristor* adalah istilah generik, yang dipakai pada satu keluarga piranti semikonduktor yang mempunyai karakteristik-karakteristik *switching regeneratif.* Ada banyak piranti dalam keluarga Thyristor termasuk *thyristor power, GTO, field controlled thyristor (FCT), Triac,* dll. Yang mempunyai dua terminal, yang dinamakan anoda (A) dan katoda (K), serupa dengan sebuah dioda, dan sebuah terminal kontrol ketiga yang dinamakan Gate (G), yang digunakan untuk mengontrol sudut konduk (penyalaan) thyristor.

Secara operasional sama dengan dioda, kecuali diperlukan satu pulsa tegangan positif sementara (*momentary*), pada terminal gate, untuk konduksi bila disambungkan dalam arah maju. Sebuah thyristor terdiri dari sebuah layer (*wafer)* silikon empat lapisan dengan tiga junction P-N. Thyristor bertegangan tinggi dan ber-daya tinggi kadang juga mempunyai sebuah terminal keempat, yang dinamakan katoda pembantu (*auxiliary*). Ini digunakan untuk sambungan ke sirkuit pemicu. Ini mencegah sirkuit untuk mengganggu sirkuit gate.

Penampilan dan konstruksi thyristor sangat mirip dengan dioda, kecuali bahwa terminal gate diperlukan untuk memicu thyristor ke dalam mode konduksi.




Gambar 3-3. Simbol thyristor.

***Thyristor Ideal :***

- *Forward conduction*: lebih sedikit resistansi
- *Forward blocking*: Lebih sedikit kerugian (tidak ada arus bocor)
- *Reverse-blocking* : lebih sedikit kerugian (tidak ada arus bocor)
- *Switch on/off time*: Sesaat

Thyristor dimatikan (*turn off*) bila menjadi *reverse-biased* dan/atau arus *forward* jatuh di bawah arus holding. Ini harus dikontrol secara eksternal dalam sirkuit power. Sebagian besar SCRs mempunyai sebuah *heat sink* untuk mendissipasi panas yang dihasilkan selama operasi.

## 3.3 Triacs

Triac dalah piranti yang berbeda dari kategori thyristor. Menurut konstruksinya terdiri dari dua buah SCR yang disambungkan anti-paralel satu sama lainnya. SCR mengkonduksi dalam arah *forward* saja, tetapi Triac mengkonduksi dalam kedua arah. Karena itu, jika output dari sebuah dioda adalah arus DC bisa disambungkan dalam sirkuit AC, output dari sebuah Triac adalah arus AC, bukan arus DC. Triac mempunyai tiga terminal yang dinamai MT1, MT2, dan Gate. Triac dapat konduksi pada arah manapun dengan pulsa gate, baik positif atau negatif. Triac dapat digunakan untuk mengubah-ubah tegangan AC rata-rata yang mengarah ke beban dengan mengubah sudut konduknya (penyalaan).

### 3.3.1 Gate-controlled piranti elektornika daya

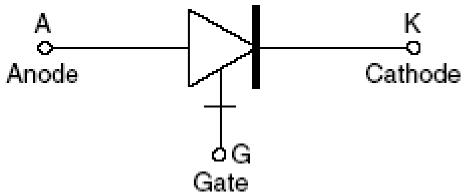
Sejumlah alat yang dikontrol pada gerbang (*gate*) telah tersedia dalam dekade terakhir. Ini cocok untuk digunakan sebagai saklar *bi-stable* pada inverter daya untuk VFD. Ini dapat dibagi ke dua kelompok utama komponen-komponen berikut:

- Komponen yang didasarkan pada teknologi Thyristor seperti GTO dan FCT

- Komponen yang didasarkan pada teknologi transistor seperti BJT, FET, dan IGBT.

**Gate turn-off thyristor (GTO)**

Thyristor GTO adalah anggota lain dari keluarga thyristor. Penampilan dan performanya sangat mirip dengan thyristor normal, dengan satu fitur tambahan penting yakni bahwa ia dapat dimatikan (*turn off*) dengan mengaplikasi pulsa arus negatif pada gate. Thyristor GTO mempunyai kapabilitas tegangan dan arus tinggi dan umumnya digunakan untuk konverter yang lebih besar. Ini terutama bila komutasi sendiri (*self-commutation*) diperlukan.




Gambar 3-4. Simbol Thyristor GTO.

***Thyristor GTO Ideal***

- *Forward conduction*: lebih sedikit resistansi
- *Forward blocking*: Lebih sedikit kerugian (tidak ada arus bocor)
- *Reverse blocking* : lebih sedikit kerugian (tidak ada arus bocor)
- *Waktu switch on/off*: Sesaat

Performa dari GTO sama dengan thyristor normal. Konduksi arah maju dihambat hingga satu pulsa positif diaplikasi ke terminal gate. Bila GTO telah dihidupkan, maka berprilaku seperti thyristor dan terus mengkonduksi bahkan setelah pulsa gate dihilangkan, jika arus itu lebih tinggi dibanding arus holding. GTO mempunyai penurunan tegangan forward lebih tinggi biasanya 3-5 V. Arus *latching* dan arus *holding* juga sedikit lebih tinggi.

Perbedaan penting adalah bahwa GTO bisa dimatikan dengan satu pulsa arus negatif yang diaplikasi pada terminal gate. Fitur penting ini memungkinkan GTO untuk digunakan dalam sirkuit inverter berkomutasi sendiri. Magnitudo pulsa off besar dan bergantung pada magnuitudo arus dalam sirkuit power. Biasanya arus gate harus 20% dari arus anoda. Akibatnya, sirkuit pemicu harus cukup besar dan ini mengakibatkan kehilangan komutasi tambahan. Seperti thyristor, konduksi dihambat dalam arah *reverse-biased* atau jika arus *holding* jatuh di bawah satu level tertentu.

Karena GTO adalah satu tipe khusus thyristor, sebagian besar karakteristik lain dari sebuah thyristor yang dicakup di atas juga berlaku pada GTO. Konstruksi mekanik GTO sangat mirip dengan thyristor normal dengan tipe-tipe *stud* umum untuk unit-unit yang lebih kecil dan tipe-tipe disk umum untuk unit-unit yang lebih besar. Thyristor GTO biasanya digunakan untuk aplikasi-aplikasi arus dan tegangan tinggi dan lebih kokoh dan toleran pada *over-current*, *over-voltage* dibanding power transistor . GTO tersedia untuk rating hingga 2500 A dan 4500 V. Kelemahan utama adalah arus gate tinggi yang diperlukan untuk mematikan GTO dan penurunan volt forward tinggi.

**Field controlled thyristor (FCT)**

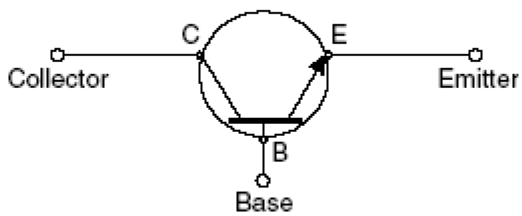
Walaupun GTO mungkin mempertahankan dominasinya untuk aplikasi-aplikasi konverter berdaya tinggi dan ber-komutasi sendiri selama beberapa waktu, tipe-tipe baru thyristor sedang dikembangkan di mana gate dikontrol dengan tegangan. *Turn-on* dikontrol dengan mengaplikasi sinyal tegangan positif pada gate dan *turn-off* dikontrol dengan tegangan negatif. Alat seperti itu dinamakan FCT. Nama itu mempengaruhi kesamaan dengan FET. FCT diharapkan pada akhirnya menggantikan GTO karena ia mempunyai sirkuit kontrol sederhana di mana biaya dan kerugian bisa dikurangi cukup besar.

**Bipolar junction transistors (BJT)**

Transistor secara tradisional telah digunakan sebagai alat-alat amplifikasi (penguat), di mana kontrol basis arus digunakan untuk membuat transistor konduktif hingga derajat yang lebih besar atau lebih kecil. Hingga baru-baru ini, mereka tidak banyak digunakan untuk aplikasi power elektronik .

Alasan utama adalah karena sirkuit-sirkuit protektif dan kontrol jauh lebih rumit dan mahal, dan transistor tidak tersedia untuk aplikasi berdaya tinggi. Mereka juga tidak mempunyai kapasitas *overload* thyristor dan untuk melindungi transistor dengan sekering tidak layak.

Transistor NPN, yang dikenal sebagai BJT, adalah alat hemat biaya untuk digunakan dalam konverter elektronika daya. BJT modern biasanya disuplai dalam sebuah modul yang dipadatkan dan masing-masing BJT mempunyai dua terminal power, yang dinamakan kolektor (C) dan emitter (E), dan satu terminal kontrol ketiga yang dinamakan base (B).



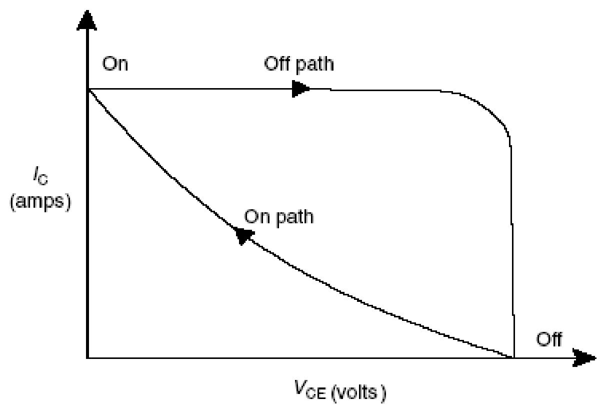

Gambar 3-5. Simbol Transistor.

***TransistorIdeal***

- *Forward conduction*: lebih sedikit resistansi
- *Forward blocking*: Lebih sedikit kerugian (tidak ada arus bocor)
- *Reverse blocking*: lebih sedikit kehilangan (tidak ada arus bocor)
- *Waktu switch on/off*: Sesaat

Sebuah transistor tidak selalu merupakan alat *bi-stable* (on/off). Untuk membuat sebuah transistor sesuai untuk kondisi-kondisi dalam sebuah

sirkuit elektronika daya di mana diperlukan untuk men-switch dari keadaan blocking (tegangan tinggi, arus rendah) ke keadaan konduksi (tegangan rendah, arus tinggi) ia harus digunakan dalam kondisi-kondisi ekstrim—sepenuhnya off atau sepenuhnya on. Ini potensial menekan transistor dan trigger, dan sirkuit-sirkuit pelindung harus dikordinir, untuk menjamin transistor tidak dibolehkan beroperasi di luar area operasi amannya. Konduksi forward dihambat hingga arus positif diaplikasi pada terminal gate dan ia mengkonduksi sepanjang tegangan diaplikasi. Selama konduksi forward, juga memperlihatkan penurunan tegangan forward, yang menyebabkan kerugian dalam sirkuit power. BJT bisa dimatikan (*turn off*) dengan mengaplikasi arus negatif pada gate.




Gambar 3-6. *Batas-batas V-I yang diinginkan ketika men-switch sebuah BJT*

Sirkuit-sirkuit kontrol dan protektif telah dikembangkan untuk melindungi transistor terhadap *over-current* ketika dihidupkan dan terhadap *over-voltage* ketika ia dimatikan (Gambar 3-6). Bila dihidupkan, sirkuit kontrol harus menjamin bahwa transistor tidak muncul dari saturasi, kalau tidak akan disyaratkan untuk mendissipasi power tinggi. Dalam prakteknya, sistem kontrol telah terbukti hemat biaya, efisien, dan handal.

Berikut ini adalah kelebihan-kelebihan BJT sebagai sebuah saklar:

- Memerlukan tegangan driving yang sangat rendah
- Bisa beroperasi pada kecepatan yang sangat tinggi

- Bisa dihidupkan dan dimatikan dari terminal base, yang membuat mereka cocok untuk sirkuit inverter berkomutasi sendiri
- Kapabilitas penanganan power yang baik
- Penurunan teangan konduksi forward rendah.

Berikut ini adalah kelemahan BJT sebagai saklar:

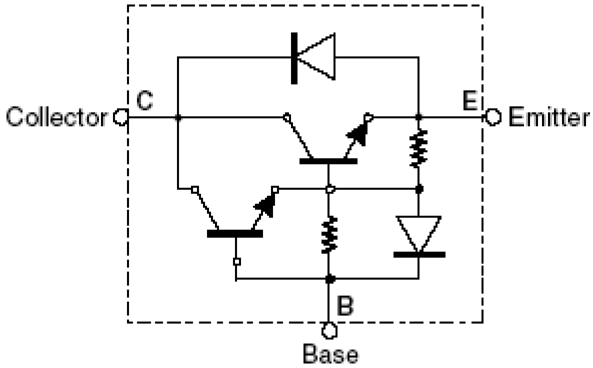
- Dianggap kurang kokoh dan kurang toleran terjadi *overload* dan ‗*spikes*' dibanding thyristor
- Tidak mentolerir reverse voltage
- Waktu switching relatif lambat dibanding alat lain
- Area operasi aman yang buruk
- Mempunyai persyaratan driver gate terkontrol arus yang kompleks.

Thyristor GTO sering lebih disukai dibanding konverter. Bila BJT digunakan dalam bridge inverter, mereka harus dilindungi terhadap *reverse voltage* tinggi, dengan menggunakan sebuah reverse dioda secara seri atau paralel. Karena alasan yang sama, transistor tidak digunakan dalam bridge rectifier yang harus mampu menahan *reverse voltage*.

Faktor amplifikasi base dari sebuah transistor agak rendah (biasanya 5-10 kali). Akibatnya sirkuit *trigger* transistor harus digerakkan oleh transistor pembantu untuk mengurangi magnitudo arus *trigger base* yang diperlukan dari sirkuit kontrol. Untuk melakukan ini, sambungan Darlington digunakan.

Gambar 3-7 menunjukkan sebuah sambungan Darlington rangkap, tetapi untuk aplikasi daya tinggi, dua transistor pembantu (*triple Darlington*) bisa digunakan dalam *cascade* untuk mencapai faktor amplifikasi yang

diperlukan. Faktor amplifikasi menyeluruh secara aproksimasi merupakan produk dari faktor-faktor amplifikasi dari dua (atau tiga) transistor.




Gambar 3-7. *Transistor Darlington power*

Transistor, yang digunakan dalam aplikasi VSD, biasanya dipabrikasi sebagai satu *integrated circuit* dan dipadatkan ke dalam sebuah modul tiga terminal, bersaing dengan komponen-komponen perlu lainnya, seperti resistor dan dioda perlindungan anti paralel. Modul itu mempunyai sebuah base terisolasi yang cocok untuk pemasangan langsung ke *heat sink*. Tipe modul ini kadang dinamakan modul transistor *Power Darlington*.

Seperti ditunjukkan dalam Gambar 3-7, dioda anti-paralel melindungi transistor dari bias terbalik (*reverse-biasing*). Dalam prakteknya, dioda ini adalah konstruksi terpadu lambat dan mungkin tidak cukup cepat untuk aplikasi inverter. Akibatnya, pabrikan konverter kadang menggunakan sebuah dioda cepat eksternal untuk melindungi transistor. BJT power tersedia untuk rating hingga maksimum sekitar 300 A dan 1400 V. Untuk VSD yang memerlukan rating power lebih tinggi, GTO biasanya digunakan dalam sirkuit inverter.

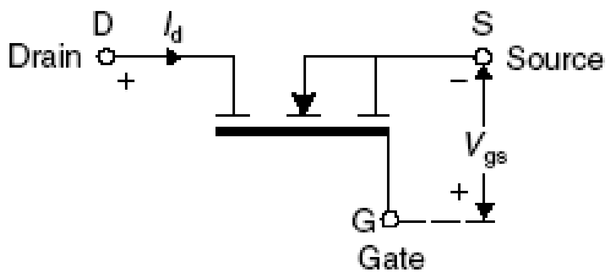
**Field effect transistor (FET)**

BJT adalah alat yang digerakkan arus. Arus mengalir melalui kontrol-kontrol base dan aliran arus adalah antara kolektor dan emitter. FET Gate

dikontrol oleh tegangan. FET adalah tipe khusus transistor yang terutama cocok untuk aplikasi switching berkecepatan tinggi.

Kelebihan utamanya adalah bahwa Gate dikontrol oleh tegangan, bukan dikontrol oleh arus. Ia berprilaku seperti resistansi yang dikontrol tegangan dengan kapasitas untuk performa berfrekuensi tinggi.

FET tersedia dalam sebuah konstruksi khusus yang dikenal sebagai MOSFET. MOS adalah kependekan dari *metal oxide silicon*. MOSFET adalah alat tiga terminal dengan terminal-terminal yang dinamakan source (S), drain (D), dan gate (G), koresponden dengan emitter, kolektor, dan gate dari transistor NPN.




Gambar 3-8. Simbol FET

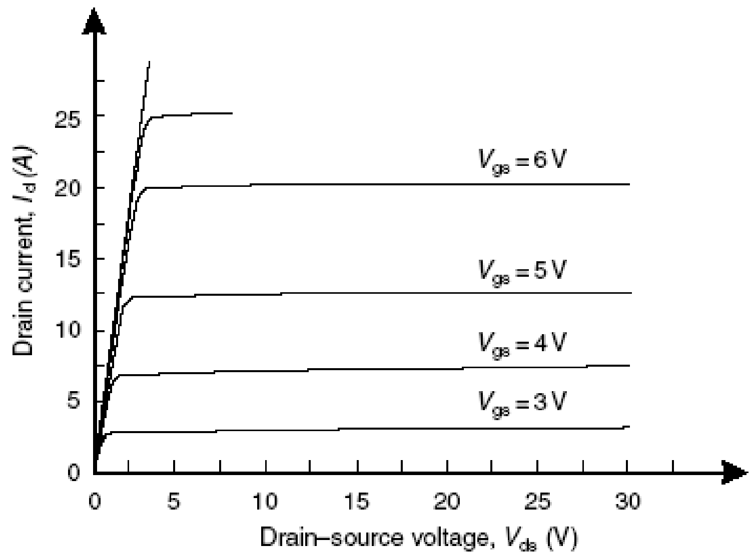
***FET Ideal :***

- *Forward conduction*: lebih sedikit resistansi
- *Forward blocking*: Lebih sedikit kerugian (tidak ada arus bocor)
- *Reverse blocking*: lebih sedikit kerugian (tidak ada arus bocor)
- *Waktu switch on/off*: Sesaat

Performa menyeluruh dari sebuah FET serupa dengan sebuah power transistor, kecuali bahwa gate dikontrol oleh tegangan. Konduksi forward dihambat jika tegangan gate rendah, biasanya kurang dari 2 V. Bila

tegangan positif $V_{gs}$ diaplikasi ke terminal gate, FET mengkonduksi dan arus naik dalam FET ke level yang bergantung pada tegangan gate. FET akan mengkonduksi sepanjang tegangan *gate* diaplikasikan. FET dapat dimatikan dengan menghilangkan tegangan yang diaplikasi ke terminal gate atau dengan membuatnya negatif.

MOSFETs adalah alat pembawa mayoritas, sehingga mereka tidak diperburuk oleh waktu-waktu switching lama. Dengan waktu switching mereka yang sangat singkat, kehilangan switching rendah. Akibatnya, mereka paling cocok untuk aplikasi switching berfrekuensi tinggi. Satu karakteristik performa biasa dari FET ditunjukkan dalam Gambar 3-9.




Gambar 3-9. *Karakteristik biasa dari sebuah FET*

Awalnya, switching berkecepatan tinggi bukan satu persyaratan penting untuk aplikasi konverter AC. Dengan perkembangan inverter PWM, switching berfrekuensi tinggi telah menjadi satu fitur yang diinginkan untuk memberi bentuk gelombang arus output smooth. Akibatnya, FET power tidak banyak digunakan hingga sekarang.

Kini FET hanya digunakan untuk konverter berfrekuensi PWM kecil. Rating tersedia dari sekitar 100 A pada 50 V hingga 5 A pada 1000 V, tetapi untuk aplikasi VSD, MOSFET perlu dalam range 300-600 V. Kelebihan dan kekurangan MOSFET nyaris merupakan kebalikan dari BJT.

Kelebihan utama MOSFET power diberi di bawah:

- Kapabilitas *switching* berkecepatan tinggi (10 – 100 ns)
- Sirkuit perlindungan relatif sederhana
- Gate driver terkontrol tegangan yang relatif sederhana dengan arus gate rendah.

Kelemahan atau kekurangan utama MOSFET power adalah:

- Kapabilitas penanganan power relatif rendah
- Penurunan *forward voltage* relatif tinggi, yang mengakibatkan kehilangan lebih tinggi dibanding GTO dan BJT, membatasi penggunaan MOSFET untuk aplikasi power lebih tinggi.

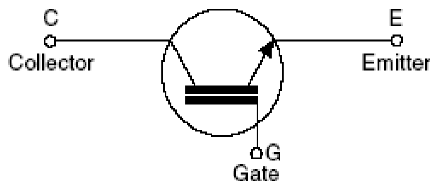
**Insulated gate bipolar transistor (IGBT)**

IGBT adalah upaya untuk menyatukan fitur-fitur terbaik teknologi BJT dan teknologi MOSFET.

Konstruksi IGBT serupa dengan MOSFET dengan satu lapisan tambahan untuk memberikan modulasi konduktivitas, yang merupakan alasan untuk tegangan berkonduksi rendah BJT.

Piranti IGBT mempunyai satu *forward blocking* yang baik tetapi mempunyai kemampuan *reverse blocking* yang sangat terbatas. Yang dapat beroperasi pada intensitas arus lebih tinggi dibanding BJT atau MOSFET dengan memungkinkan ukuran chip yang lebih kecil.

IGBT adalah piranti tiga terminal. Terminal-terminal daya dinamakan emitter (E) dan kolektor (C), dengan menggunakan terminologi BJT, sementara terminal kontrol dinamakan gate (G), dengan menggunakan terminologi MOSFET.

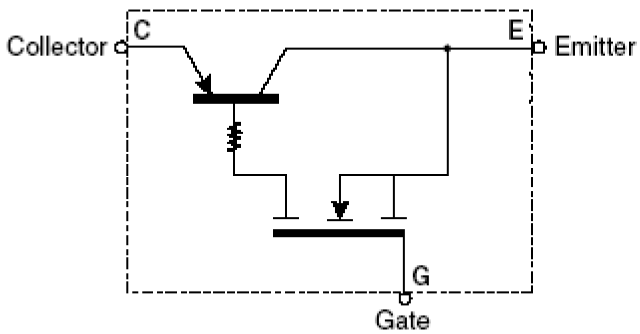



Gambar 3-10. Simbol IGBT.

***IGBT Ideal :***

- *Forward conduction*: lebih sedikit resistansi
- *Forward blocking*: Lebih sedikit kerugian (tidak ada arus bocor)
- *Reverse blocking*: lebih sedikit kerugian (tidak ada arus bocor)
- *Waktu switch on/off*: Sesaat

Rangkaian ekivalen dari IGBT menunjukkan bahwa IGBT bisa dianggap sebagai piranti *hybrid* (campuran), serupa dengan konfigurasi transistor Darlington, dengan sebuah pengendali MOSFET, dan sebuah transistor PNP bipolar. Walaupun simbol sirkuit di atas menunjukkan bahwa piranti tersebut terkait dengan transistor NPN,




Gambar 3-11. Rangkaian ekivalen IGBT.

Karakteristik *gate input* dan persyaratan *gate drive* sangat mirip dengan MOSFET daya. Tegangan ambang batas (*threshold*) biasanya adalah 4V. Turn-on memerlukan tegangan 10-15 V dan membutuhkan waktu sekitar 1 μs. Turn-off membutuhkan waktu sekitar 2 μs dan bisa diperoleh dengan mengaplikasi 0 V ke terminal gate. Waktu *turn-off* bisa dipercepat, bila perlu, dengan menggunakan tegangan drive negatif. Alat-alat IGBT bisa dihasilkan dengan waktu switching yang lebih cepat dengan akibat penurunan tegangan forward yang meningkat.

IGBT sekarang tersedia dalam batasan mulai dari beberapa amps hingga 500 A pada 1500 V, yang cocok untuk AC VSDs tiga fase yang dibatasi daya hingga sekitar 500 kW pada tagangan 380V/415V/480V. Ini dapat digunakan pada frekuensi switching hingga 100 kHz. BJTs masa kini sebagian besar telah digantikan dengan IGBTs untuk AC VSDs.

Berikut ini adalah kelebihan utama IGBT:

- Kapabilitas penanganan daya yang baik
- Penurunan tegangan konduksi forward rendah 2-3 V, yang lebih tinggi dibanding untuk BJT tetapi lebih rendah dibanding untuk MOSFET dari rating serupa.
- Tegangan ini meningkat seiring dengan temperatur yang membuat alat tersebut mudah dioperasikan secara paralel tanpa bahaya instabilitas termal.
- Kapabilitas switching berkecepatan tinggi
- Gate driver terkontrol tegangan yang relatif sederhana
- Arus gate rendah.

Beberapa fitur penting lain IGBT adalah:

- Tidak ada breakdown sekunder dengan IGBT, yang memberi area operasi aman yang baik dan kehilangan switching rendah.

- Hanya snubbers kecil diperlukan
- Kapasitansi inter-elektroda tidak sepenting dalam MOSFET, sehingga mengurangi *feedback* Miller.

Tidak ada dioda dalam IGBT, sebagaimana dengan MOSFET, dan sebuah dioda terpisah harus ditambahkan dalam anti-paralel bila konduksi terbalik diperlukan, misalnya, dalam inverter sumber tegangan.

# BAB IV

## KELISTRIKAN VFD

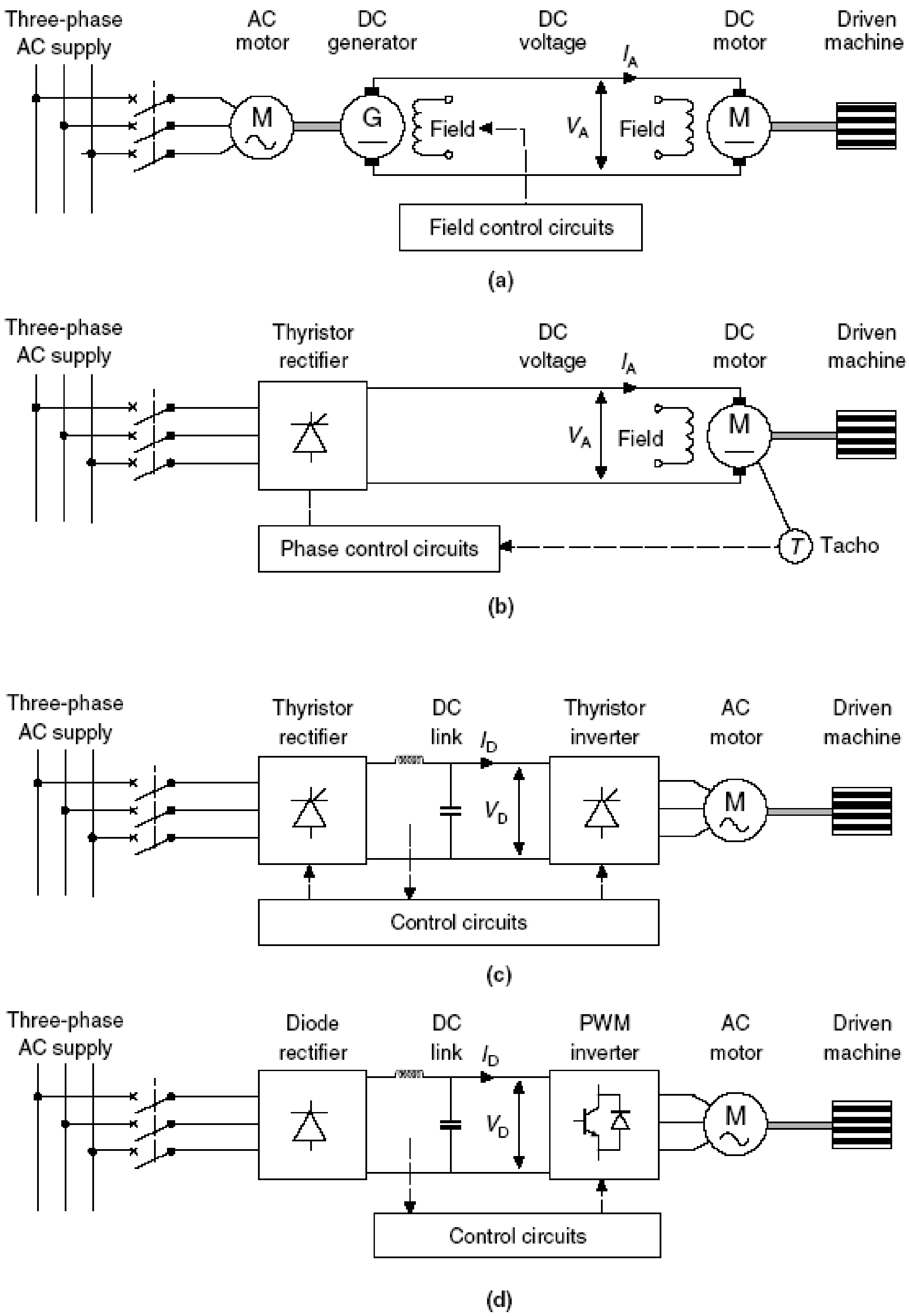
***Indikator Keberhasilan:*** *Setelah mengikuti pembelajaran siswa diharapkan dapat memahami tentang kelistrikan VFD.*

Motor AC mendominasi dalam aplikasi VFD disebabkan oleh reliabilitas mereka. Mereka juga membantu untuk menciptakan konverter dan sirkuit kontrol yang lebih murah.

Sebagaimana telah kita lihat sebelumnya, motor induksi AC terutama adalah motor berkecepatan konstan. Sejak 1980an, popularitas AC VFD telah berkembang cepat, terutama disebabkan oleh berbagai kemajuan dalam teknologi elektronik power dan teknologi kontrol digital, yang mempengaruhi biaya dan performa tipe VFD ini. Daya tarik utama dari AC VFD adalah reliabilitas kuat dan biaya rendah motor induksi AC *squirrel-cage* (sarang tupai) dibanding motor DC.

Sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 4-1, berbagai perubahan dalam drives yang digunakan berkenaan dengan waktu telah ditunjukkan. Seksi-seksi gambar 4-1 (a), (b), (c) dan (d) adalah seperti berikut:

(a) Sistem Ward-Leonard
(b) Pengendali DC terkontrol thyristor
(c) Pengendali AC inverter sumber tegangan (PAM)
(d) Pengendali AC sumber tegangan PWM (PWM)




Gambar 4-1. *Komponen-komponen utama dari berbagai tipe VFD*

Alur perkembangan dari sistem *Ward-Leonard* ke pengendali DC terkontrol thyristor dan kemudian ke konverter ber-tegangan variabel dan berfrekuensi variabel AC tipe PWM diillustrasikan dalam Gambar 4-1. Dalam langkah pertama, dari (a) ke (b), generator – motor set berbiaya tinggi telah digantikan dengan rectifier thyristor terkontrol fase. Dalam langkah kedua, dari (b) ke (d), motor DC berbiaya tinggi telah digantikan dengan inverter PWM elektronika daya dan sebuah motor induksi AC kuat sederhana. Dalam VFD AC, sistem komutasi mekanik motor DC telah digantikan dengan sirkuit elektronik power yang dinamakan inverter. Tetapi kesulitan utama dengan VFD AC selalu kompleksitas, biaya, dan reliabilitas sirkuit inverter frekuensi AC.

## 4.1 Pengontrolan kecepatan motor AC

Berbagai perkembangan dalam elektronik power selama 10-15 tahun terakhir telah membuat mungkin untuk mengontrol bukan saja kecepatan motor induksi AC tetapi juga *torque* (kopel). AC-VFD modern, dengan kontrol flux-vector, sekarang bisa memenuhi semua persyaratan performa dari aplikasi-aplikasi yang paling rumit sekalipun.

Metode-metode kontrol kecepatan mencakup:

1. Kontrol tegangan stator
2. Kontrol frekuensi suplai
3. kontrol resistansi rotor
4. perubahan kutub (*pole*)

Biasanya, kontrol kecepatan motor AC dicapai dengan mengubah-ubah frekuensi suplainya. Untuk mempertahankan membuat kerugian sangat sedikit, frekuensi tegangan terminal diubah untuk membuat rasio v/f konstan. Metode kontrol frekuensi pengubahan kecepatan motor AC adalah teknik terkenal selama puluhan tahun. tetapi baru belakangan ini ia telah menjadi metode kontrol VFD yang layak secara teknis dan ekonomis.

Pengendali AC telah menjadi metode kontrol kecepatan yang lebih hemat biaya, dibanding pengendali DC, untuk sebagian besar aplikasi VFD hingga 1000 kW. Ini juga merupakan solusi yang lebih disukai secara teknis, untuk banyak lingkungan industri, di mana reliabilitas dan pemeliharaan mudah, yang terkait dengan motor induksi *squirrel-cage* AC menjadi penting.

Tegangan suplai AC utama dikonversi ke arus dan tegangan DC melalui sebuah *rectifier* (penyearah). Arus dan tegangan DC disaring untuk memperhalus puncak-puncak sebelum dimasukkan ke inverter, selanjutnya dikonversi ke frekuensi dan tegangan AC variabel. Tegangan output dikontrol, sehingga rasio antara tegangan dan frekuensi tetap konstan untuk menghindari kelebihan fluksi pada motor. Motor AC mampu memberi batasan torsi (kopel nominal) diatas batasan kecepatan hingga 50 Hz, tanpa kenaikan yang signifikan dalam kerugian-kerugian.

Motor bisa dijalankan pada kecepatan-kecepatan di atas frekuensi nominal (*rated frequency*), tetapi dengan *torque* output yang berkurang. Torque direduksi karena reduksi dalam *air-gap flux*, yang bergantung pada rasio V/f. Pada frekuensi-frekuensi di atas frekuensi dasar 50 Hz, torsi direduksi sebanding dengan pengurangan kecepatan.

Salah satu kelebihan utama dari sistem kontrol kecepatan VVVF (*variable voltage variable frequency*) adalah bahwa, walaupun pengontrolannya kompleks, motornya sendiri merupakan sebuah *konstruksi squirrel-cage*, yang barang kali merupakan bentuk motor elektrik paling kokoh dan beban *maintenance* yang tersedia. Ini terutama berguna bilamana motor-motor dipasang di lokasi berbahaya, atau dalam posisi-posisi yang tidak dapat diakses, yang membuat pembersihan dan pemeliharaan rutin sulit. Di lokasi-lokasi yang memerlukan mesin penggerak yang dilengkapi dengan panyangga (*enclosure*) tahan api atau bahkan kedap air, sebuah motor induksi AC *squirrel-cage* akan lebih murah dibanding motor DC.

Di sisi lain, satu masalah tambahan dengan motor *squirrel-cage* AC standar bila digunakan untuk aplikasi berkecepatan variable, adalah pendinginnya dengan menggunakan kipas yang dipasang pada poros. Pada kecepatan-kecepatan rendah, pendinginan dikurangi, yang mempengaruhi kemampuan beban dari pengendali. Torsi output kontinu dari pengendali harus dibatasi untuk kecepatan-kecepatan lebih rendah, kalau sebuah kipas pembantu ber-daya terpisah tidak digunakan untuk mendinginkan motor. Ini serupa dengan persyaratan pendinginan motor-motor DC, yang memerlukan kipas pendinginan.

### 4.2 Kontrol kecepatan motor Arus Searah (DC)

Pengendali arus-searah banyak digunakan dalam industri karena kecepatan variabel, regulasi kecepatan yang baik, pengereman, dan kemampuan pembalikannya.

Di masa lalu, motor arus searah digunakan di sebagian besar aplikasi VFD terlepas dari kompleksitas, biaya tinggi, dan keperluan pemeliharan tinggi seperti motor arus searah.

Bahkan sekarangpun pengendali arus searah masih sering digunakan untuk aplikasi-aplikasi VFD yang lebih rumit. Contoh-contoh dari ini adalah pengendali seksional untuk mesin kertas yang memerlukan respon dinamik cepat dan kontrol kecepatan dan torsi terpisah.

Metode-metode kontrol kecepatan adalah sebagai berikut :

1. Kontrol Tegangan armature
2. Kontrol field flux.

Sebagian besar pengendali arus searah menggunakan metode kontrol tegangan jangkar dan kontrol fluksi medan, untuk mencapai regulasi kecepatan, masing-masing di bawah kecepatan nominal (*rated speed*) dan di atas kecepatan nominal. Dalam kedua kasus, konverter atau

penyearah yang setengah terkontrol atau terkontrol sepenuhnya digunakan untuk mencapai tegangan searah variabel, dari tegangan bolak-balik, untuk mensuplai ke tegangan jangkar

Pengendali AC dan pengendali DC biasanya menggunakan konverter atau penyearah dan inverter. Bagian berikut merinci alat-alat seperti itu.

# BAB V

## PENYEARAH ELEKTRONIKA DAYA (KONVERTER AC/DC)

***Indikator Keberhasilan:*** *Setelah mengikuti pembelajaran ini siswa diharapkan dapat memahami karakteristik dan prinsip kerja penyearah elektronika daya dengan benar sesuai spesifikasi.*

Piranti ini untuk mengkonversi daya AC satu fase atau tiga fase ke arus dan tegangan DC halus (*smooth*). Alat-alat bi-stable sederhana, seperti dioda dan thyristor, bisa secara efektif digunakan untuk tujuan ini.

### 5.1 Asumsi

Ketika menganalisa sirkuit elektronik power, diasumsikan bahwa alat-alat semikonduktor bi-stable, seperti dioda dan thyristor, adalah saklar-saklar ideal, tanpa ada kehilangan dan penurunan tegangan *forward* minimal. Juga akan diasumsikan bahwa reaktor, kapasitor, resistor, dan komponen lain sirkuit-sirkuit tersebut mempunyai karakteristik-karakteristik linier ideal tanpa ada kerugian.

Begitu operasi sebuah sirkuit dipahami, ketidaksempurnaan yang terkait dengan komponen-komponen praktis bisa diperkenalkan untuk memodifikasi performa sirkuit elektronika daya. Dalam elektronika daya, operasi suatu konverter tergantung pada pensaklaran yang sedang di-ON dan di-OFF-kan secara berangkai. Arus melewati sebuah saklar ketika ON dan dihambat ketika OFF.

Komutasi adalah transfer arus dari satu saklar yang menjadi OFF, ke saklar lainnya yang menjadi ON. Dalam sebuah rangkaian penyearah dioda, sebuah dioda menjadi ON dan kemudian mulai mengkonduksi arus bila ada tegangan arah maju (forward) melintasinya, yakni tegangan arah maju (forward) yang melintasinya menjadi positif. Proses ini biasanya menghasilkan tegangan arah maju (forward) pada dioda lain yang

menjadi negatif, yang kemudian mematikan dan menghentikan pengkonduksian arus.

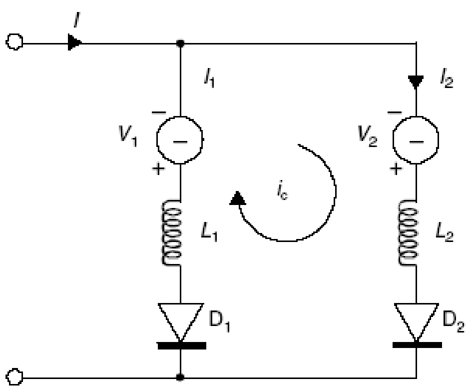
Dalam sebuah rangkaian penyearah thyristor, saklar-saklar juga membutuhkan sinyal pada gerbangnya (gate) untuk menjadi ON dan OFF. Faktor-faktor yang mempengaruhi komutasi diilustrasikan dalam rangkaian dioda ideal dalam Gambar 5-1, yang menunjukkan dua cabang rangkaian, masing-masing dengan induktansi rangkaian dan sumber tegangan searah merupakan variabelnya sendiri. Pada mulanya diasumsikan bahwa arus I sedang mengalir melalui rangkaian dan bahwa magnitudo tegangan $V_1$ lebih besar dibanding $V_2$. Karena $V_1 > V_2$, dioda $D_1$ mempunyai tegangan arah maju (forward ) positif yang mengkonduksi arus $I_1$ melalui induktansi rangkaian L1. Dioda $D_2$ mempunyai tegangan arah maju (forward) negatif yang menghambat dan tidak mengalirkan arus.

Akibatnya, pada waktu $t_1$

$$I_1 = I\sqrt{2}$$

$$I_2 = 0$$

Anggaplah tegangan $V_2$ dinaikkan ke harga yang lebih besar dari $V_1$, tegangan forward pada dioda $D_2$ menjadi positif, dan ia mulai menghidupkan (on). Tetapi induktansi L1 mencegah arus $I_1$ untuk berubah segera dan dioda $D_1$ tidak akan segera mati (off). Karena itu, dioda $D_1$ dan dioda $D_2$ tetap ON selama suatu periode tumpang-tindih yang dinamakan waktu komutasi $T_c$.




Gambar 5-1. *Sirkuit sederhana untuk mengillustrasikan komutasi dari Dioda $D_1$ ke $D_2$*

Bila kedua dioda di-on-kan, sebuah sirkuit tertutup dibentuk yang melibatkan kedua cabang. Tegangan sirkuit efektif $V_c = (V_2 - V_1)$, yang dinamakan tegangan komutasi, menggerakkan arus sirkulasi $I_c$, yang dinamakan arus komutasi, melalui kedua cabang yang mempunyai total induktansi sirkuit $L_c = (L_1 + L_2)$.

Dalam sirkuit ideal ini, penurunan tegangan pada dioda-dioda itu dan resistensi sirkuit telah diabaikan. Dari teori elektrik dasar mengenai sirkuit induktif, arus $I_c$ meningkat seiring dengan waktu pada suatu rate yang bergantung pada induktansi sirkuit. Magnitudo arus komutasi bisa dihitung dari persamaan-persamaan berikut:

$$(V_2 - V_1) = (L_1 + L_2)\frac{di_c}{dt}$$

$$V_c = L_c\frac{di_c}{dt}$$

Jika komutasi mulai pada waktu $t_1$ dan selesai pada waktu $t_2$, magnitudo arus komutasi $I_c$ pada suatu waktu t, selama periode komutasi, bisa dihitung, dengan mengintegrasikan persamaan di atas dari waktu $t_1$ ke t.

$$I_c = \frac{1}{L_c}\int V_c dt$$

Selama periode komutasi, diasumsikan bahwa arus menyeluruh melalui sirkuit tetap konstan.

$I = (I_1 + I_2)$ konstan

Ketika arus komutasi yang bersirkulasi meningkat, berikut ini berlaku:

- Arus ($I_2$) melalui dioda yang menjadi ON meningkat harganya

  $I_2 = I_c$ meningkat

- Arus ($I_1$) melalui dioda yang sedang menjadi OFF menurun harganya.

  $I_1 = I - I_c$ menurun

Untuk contoh khusus yang ini, dapat diasumsikan bahwa tegangan komutasi $V_c$ konstan selama periode singkat komutasi. Pada waktu t, integrasi menghasilkan harga $I_c$ berikut, yang naik secara linier seiring dengan waktu.

$$I_c = \frac{V_c}{L_c}(t - t_1)$$

Bila $I_c$ telah meningkat ke sebuah harga yang sama dengan arus beban I pada waktu $t_2$, maka arus itu telah ditransfer dari cabang 1 ke cabang 2, dan arus melalui saklar yang menjadi off telah turun ke nol. Maka komutasi lengkap. Akibatnya, pada waktu $t_2$

$$I_1 = 0$$

$$I_2 = I_c = I$$

Pada akhir komutasi ketika $t = t_2$, yang menempatkan $I_c$ ke I dalam persamaan di atas, waktu yang dihabiskan untuk mentransfer arus dari satu cabang sirkuit ke yang lainnya (waktu komutasi), bisa dihitung sebagai berikut:

$$I = \frac{V_c(t_2 - t_1)}{L_c}$$

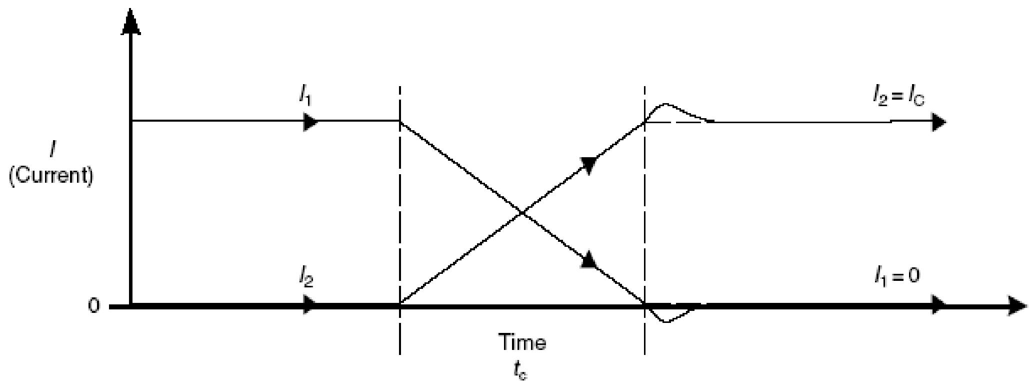
$$I = \frac{V_c t_c}{L_c}$$

$$t_c = I\frac{L_c}{V_c}$$

Jelas dari persamaan tersebut bahwa waktu komutasi $t_c$ bergantung pada induktansi sirkuit menyeluruh ($L_1 + L_2$) dan tegangan komutasi. Dari sini kita dapat menyimpulkan berikut ini:

- Suatu induktansi sirkuit besar akan menghasilkan waktu komutasi panjang.
- Suatu tegangan komutasi besar akan menghasilkan waktu komutasi pendek.

Dalam prakteknya, sejumlah deviasi dari situasi ideal ini terjadi. Dioda-dioda tidak ideal dan tidak mati (*off*) segera bila tegangan forward menjadi negatif. Bila sebuah dioda pengkonduksi disajikan dengan tegangan balik (*reverse voltage*), sejumlah arus reverse masih bisa mengalir selama beberapa mikrodetik, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 5-2. Arus $I_1$ terus menurun di luar nol ke harga negatif sebelum kembali ke nol. Ini disebabkan oleh beban bebas yang harus dipindahkan dari junction PN sebelum penghambatan dicapai.

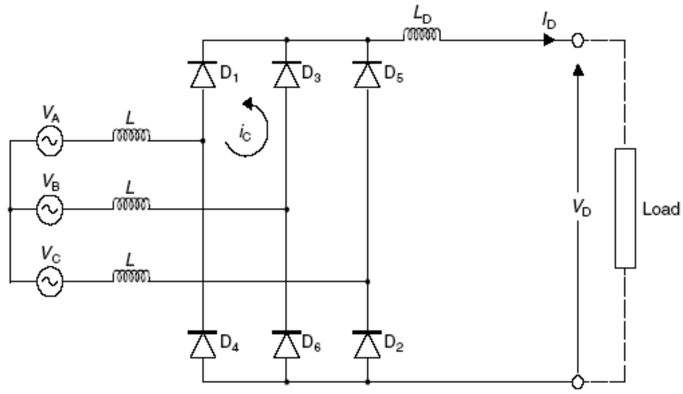



Gambar 5.2 *Arus dalam masing-masing cabang selama komutasi*

Sekalipun waktu komutasi sangat pendek, tegangan komutasi dari sebuah *AC-fed rectifier bridge* tidak tetap konstan tetapi berubah sedikit selama periode komutasi. Tegangan komutasi yang meningkat akan cenderung mengurangi waktu komutasi.

## 5.2 Komutasi tiga fase dengan jembatan enam dioda

Dalam sirkuit konverter elektronik power praktis, komutasi mengikuti rangkaian dasar yang sama seperti yang dijabarkan di atas. Gambar 5-3 menunjukkan sebuah sirkuit bridge rectifier enam pulsa untuk mengkonversi arus-arus AC tiga fase $I_A$, $I_B$, dan $I_C$, ke arus DC $I_D$.




Gambar 5-3. *Komutasi tiga fase dengan bridge dioda enam diode*

Jenis rangkaian ini relatif sederhana untuk dianalisa karena hanya dua dari keenam dioda yang mengalirkan arus pada satu waktu. Rangkaian komutasi ideal tersebut bisa dengan mudah diidentifikasi. Dalam contoh ini, komutasi diasumsikan terjadi dari dioda $D_1$ ke $D_3$ dalam kelompok positif, sementara $D_2$ mengkonduksi dalam kelompok negatif.

Dalam rangkaian jembatan elektronika daya, biasa (konvensional) dioda-dioda tersebut diberi nomor $D_1$ sampai $D_2$ dalam rangkaian ini dimana di ON-kan dan di-OFF-kan. Bila $V_A$ adalah tegangan tertinggi dan $V_C$ terendah, $D_1$ dan $D_2$ konduk.

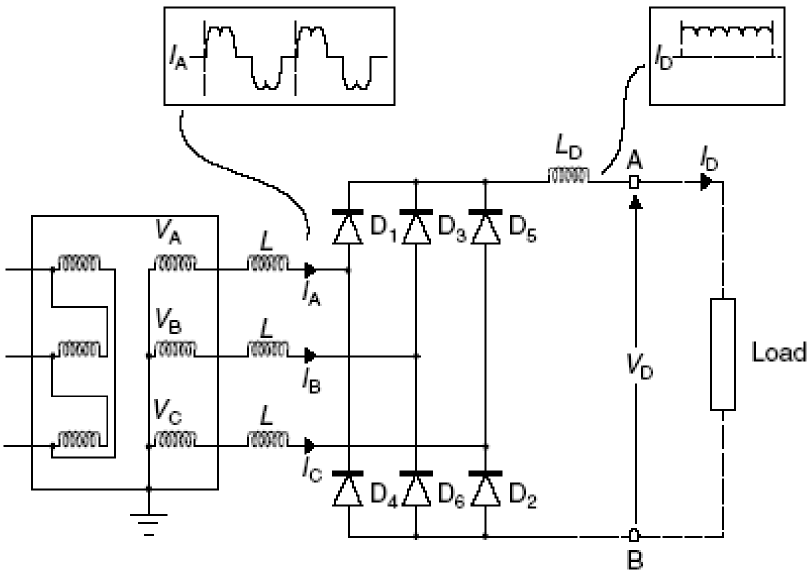
Sama dengan rangkaian ideal dalam gambar 5-3, bila $V_B$ naik melebihi $V_A$, $D_3$ menjadi on dan komutasi mentransfer arus dari dioda $D_1$ ke $D_3$. Sebagaimana sebelumnya, waktu komutasi bergantung pada induktansi sirkuit (L) dan tegangan komutasi ($V_B$ – $V_A$). Sebagaimana dapat terlihat dari contoh bridge rectifier dioda enam pulsa dalam Gambar 5-4, komutasi biasanya diawali oleh perubahan-perubahan eksternal.

Dalam kasus ini, tegangan jala-jala suplai tiga fase mengontrol komutasi. Dalam aplikasi lain, komutasi bisa juga diawali atau dikontrol oleh faktor-faktor lain, bergantung pada tipe konverter dan aplikasi. Karena itu, konverter sering digolongkan menurut sumber perubahan ekstern yang memulai komutasi. Dalam contoh di atas, konverter dikatakan dikomutasi

karena sumber tegangan komutasi adalah pada jala-jala suplai utama. Sebuah konverter dikatakan berkomutasi sendiri jika sumber tegangan komutasi berasal dari dalam konverter itu sendiri. Konverter terkomutasi gate adalah contoh-contoh sejenisnya.

### 5.3 Line-Commutated diode rectifier bridge

Salah satu dari sirkuit paling umum yang digunakan dalam elektronik power adalah bridge rectifier enam pulsa terkomutasi line tiga fase (Gambar 5-4), yang terdiri dari enam dioda dalam sebuah rangkaian jembatan. Rangkaian jembatan satu fase tidak akan dikonversi di sini karena operasi mereka dapat dideduksi sebagai satu penyederhanaan rangkaian jembatan tiga fase.




Gambar 5-4. *Bridge rectifier dioda line-komutasi*

**Asumsi**

- Tegangan-tegangan suplai kuat/tinggi dan sepenuhnya sinusoidal
- Komutasi segera dan tidak mempunyai masalah pengembalian
- Arus beban sepenuhnya rata
- Transformator dan komponen ideal

- Tidak ada penurunan tegangan dalam saklar elektronik daya.

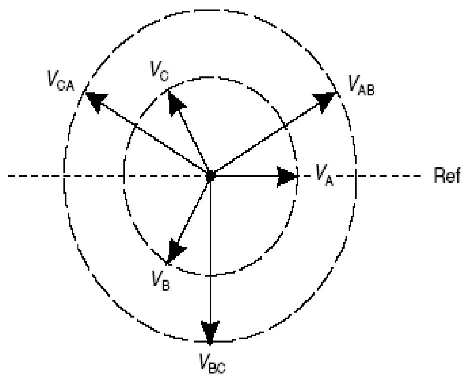
Asumsi-asumsi ini dibuat untuk mendapatkan pemahaman mengenai sirkuit-sirkuit itu dan untuk membuat taksiran-taksiran arus, tegangan, waktu komutasi. Selain itu, kondisi-kondisi pembatas yang mempengaruhi performa konverter-konverter praktis dan deviasi mereka dari kondisi-kondisi ideal akan diperiksa untuk menjembatani (*bridge*) gap dari yang ideal ke yang praktis.

Dalam rangkaian jembatan dioda, dioda-dioda tersebut tidak dikontrol dari sebuah rangkaian kontrol eksternal. Melainkan, komutasi diawali secara eksternal oleh perubahan-perubahan yang terjadi dalam tegangan-tegangan line suplai, karena itulah namanya penyearah terkomutasi jala-jala (*line-commutated rectifier*).

Menurut konvensinya, dioda-dioda tersebut diberi nomor $D_1$ sampai $D_6$ dalam rangkaian tegangan jala-jala suplai.

Tegangan jala-jala suplai tiga fase terdiri dari tiga bentuk gelombang tegangan sinusoidal, berbeda $120^0$, yang naik ke harga maksimum dalam rangkaian A-B-C. Menurut konvensi, tegangan-fase ke netral dilabelkan $V_A$, $V_B$, dan $V_C$ dan tegangan-fase ke fase adalah $V_{AB}$, $V_{BC}$, dan $V_{CA}$.

Tegangan-tegangan ini biasanya ditunjukkan secara grafik sebagai sebuah diagram vektor, yang berotasi berlawanan jarum jam pada frekuensi 50 kali per detik. Sebuah diagram vektor dari tegangan-tegangan ini serta amplitudo-amplitudo dan posisi-posisi relatifnya ditunjukkan dalam Gambar 5-5. Bentuk-bentuk gelombang tegangan sinusoidal, dari tegangan suplai, bisa diperoleh dari rotasi diagram vektor.




Gambar 5-5. *Diagram vektor tegangan-tegangan suplai main tiga fase*

Keluaran konverter adalah tegangan DC yang disearahkan $V_D$, yang mengalirkan arus DC $I_D$ melalui beban pada sisi penyearah. Dalam sirkuit ideal tersebut, diasumsikan bahwa arus DC $I_D$ konstan dan sepenuhnya smooth tanpa tegangan kerut (*ripple*). Rangkaian jembatan terdiri dari dua kelompok komutasi, satu tersambung ke positif, yang terdiri dari dioda-dioda $D_1$-$D_3$-$D_5$, dan satu tersambung ke negatif, yang terdiri dari dioda-dioda $D_4$-$D_6$-$D_2$. Komutasi tersebut mentransfer arus dari satu dioda ke yang lainnya secara berangkai dan masing-masing dioda mengkonduksi arus untuk $120^0$C setiap siklus, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 5-5.

Dalam kelompok diatas, terminal DC positif mengikuti tegangan tertinggi dalam rangkaian $V_A$-$V_B$-$V_C$ melalui dioda-dioda $D_1$-$D_3$-$D_5$. Bila $V_A$ mendekati puncak positifnya, dioda $D_1$ mengkonduksi dan tegangan terminal DC positif mengikuti $V_A$. Arus DC mengalir melalui beban dan kembali melalui salah satu dioda kelompok lebih rendah. Pada waktu yang sama, $V_B$ naik dan pada akhirnya mencapai satu titik, dimana menjadi sama dengan dan mulai melebihi $V_A$. Pada titik ini, tegangan arah maju pada dioda $D_3$ menjadi positif dan mulai menjadi on. Tegangan komutasi dalam sirkuit ini, $V_B$-$V_A$ mulai menggerakkan suatu arus komutasi yang meningkat walaupun induktansi sirkuit dan arus melalui $D_3$ mulai meningkat, ketika arus dalam $D_1$ menurun. Dalam serangkaian peristiwa yang serupa dengan yang digambarkan di atas, komutasi terjadi dan arus ditransfer dari dioda $D_1$ ke dioda $D_3$. Pada akhir periode komutasi, dioda

$D_1$ dihambat dan terminal DC positif mengikuti $V_B$ hingga komutasi berikutnya terjadi, untuk mentransfer arus ke dioda $D_5$. Setelah dioda $D_5$, komutasi mentransfer arus kembali ke $D_1$ dan siklus ini berulang.

Dalam kelompok lebih rendah, satu rangkaian serupa peristiwa-peristiwa terjadi, tetapi di sini tegangan-tegangan negatif dan arus mengalir dari beban kembali ke main. Awalnya $D_2$ diasumsikan mengkonduksi ketika $V_C$ lebih negatif dibanding $V_A$. Ketika waktu berjalan, $V_A$ menjadi sama dengan $V_C$ dan kemudian menjadi lebih negatif. Komutasi terjadi dan arus ditransfer dari dioda $D_2$ ke $D_4$. Dioda $D_2$ menjadi off dan dioda $D_4$ menjadi on. Arus kemudian ditransfer ke dioda $D_6$, lalu kembali ke $D_2$ dan siklus ini berulang.

Dalam Gambar 5-5, periode-periode konduksi dioda-dioda dalam kelompok atas dan kelompok bawah ditunjukkan pada beberapa siklus suplai tiga fase. Ini menunjukkan bahwa hanya dua dioda mengkonduksi arus pada suatu waktu (kecuali selama periode komutasi, yang diasumsikan pendek secara infinit) dan bahwa masing-masing dari keenam dioda mengkonduksi selama hanya satu bagian dari siklus dalam satu rangkaian reguler. Komutasi terjadi secara bergantian dalam kelompok atas dan kelompok bawah.

Tegangan output DC $V_D$ bukan sebuah tegangan *smooth* dan terdiri dari bagian-bagian bentuk gelombang tegangan fase ke fase. Untuk setiap siklus 50 Hz AC *Waveform* (20 ms), tegangan DC $V_D$ terdiri dari bagian-bagian enam pulsa tegangan, $V_{AB}$, $V_{AC}$, $V_{BC}$, $V_{BA}$, $V_{CA}$, $V_{CB}$, dll., karena itulah namanya bridge rectifier enam pulsa.

Magnitudo rata-rata dari tegangan DC bisa dihitung dari bentuk gelombang tegangan yang ditunjukkan dalam Gambar 5-5. Harga rata-rata diperoleh dengan mengintegrasikan tegangan atas salah satu dari

bagian $120^0$ berulang dari kurva tegangan DC. Integrasi ini menghasilkan sebuah magnitudo rata-rata dari tegangan $V_D$ sebagai berikut:

$$V_D = 1.35x(RMS\ phase - Phase\ Voltage)$$

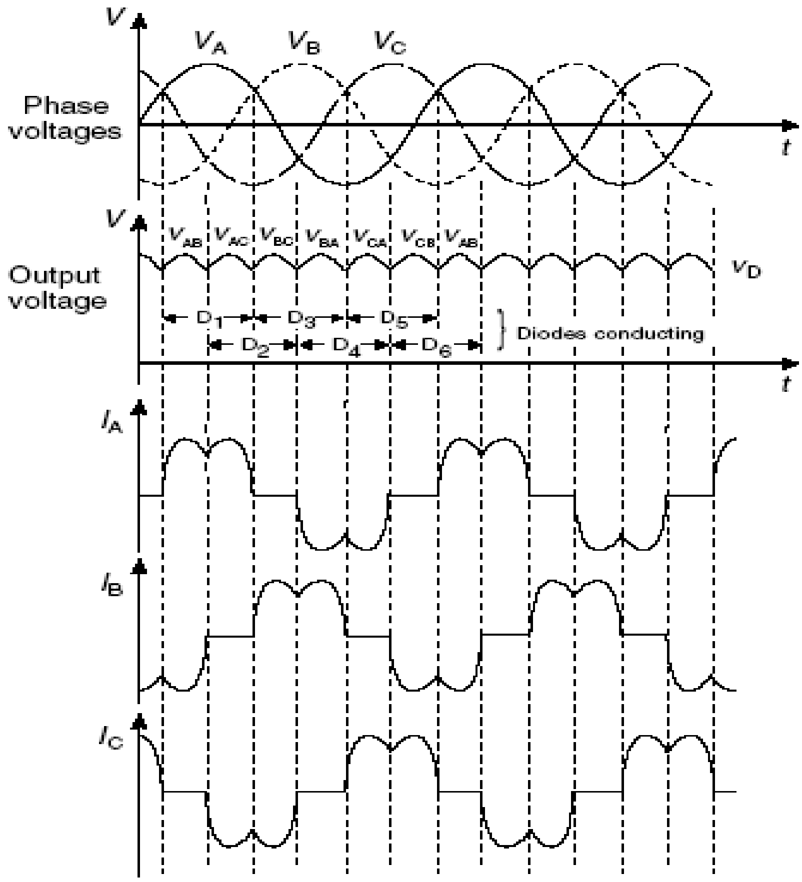
$$V_D = 1.35xV_{RMS}$$

Contohnya, jika $V_{RMS}$ = 415 V, maka $V_D$ = 560 DC. Bila ada induktansi yang cukup dalam sirkuit DC, maka arus DC $I_D$ akan mantap (*steady*) dan arus suplai DC akan terdiri dari segmen-segmen arus DC dari masing-masing dioda secara berangkai.

Sebagai contoh, arus dalam fasilitas A ditunjukkan dalam Gambar 5-6. Arus non-sinusoidal yang mengalir dalam masing-masing fase mains suplai dapat mempengaruhi performa suatu peralatan AC lain yang tersambung. Dalam prakteknya, untuk menjamin bahwa kapabilitas tegangan penghambat reverse (*reverse blocking voltage*) dispesifikasi secara tepat, perlu mengetahui magnitudo tegangan penghambat reverse yang muncul pada masing-masing dioda pada line suplai yang didesain untuk beroperasi dengan bentuk-bentuk gelombang sinusoidal.

Secara teoritis, Tegangan reverse maksimum pada sebuah dioda sama dengan puncak tegangan fase ke fase. Contohnya, Tegangan reverse $V_{CA}$ dan $V_{CB}$ muncul pada dioda $D_5$ selama periode penghambat (*blocking*). Dalam prakteknya, satu faktor pengaman (*safety factor*) sebesar 2,5 umumnya digunakan untuk menspesifikasi kapabilitas penghambat reverse (*reverse blocking*) dioda-dioda dan saklar-saklar elektronik power lain. Pada sebuah bridge rectifier yang diisi dari suplai power 415 V,

Tegangan penghambat reverse $V_{bb}$ dari dioda harus lebih tinggi dari 2,5 x 440 V = 1100 V. Karena itu, praktis secara umum digunakan dioda-dioda dengan tegangan penghambat reverse (*reverse -blocking voltage*) 1200 V.




Gambar 5-6. *Bentuk gelombang tegangan dan arus selama komutasi.*

**5.4 Line-commutated thyristor rectifier bridge**

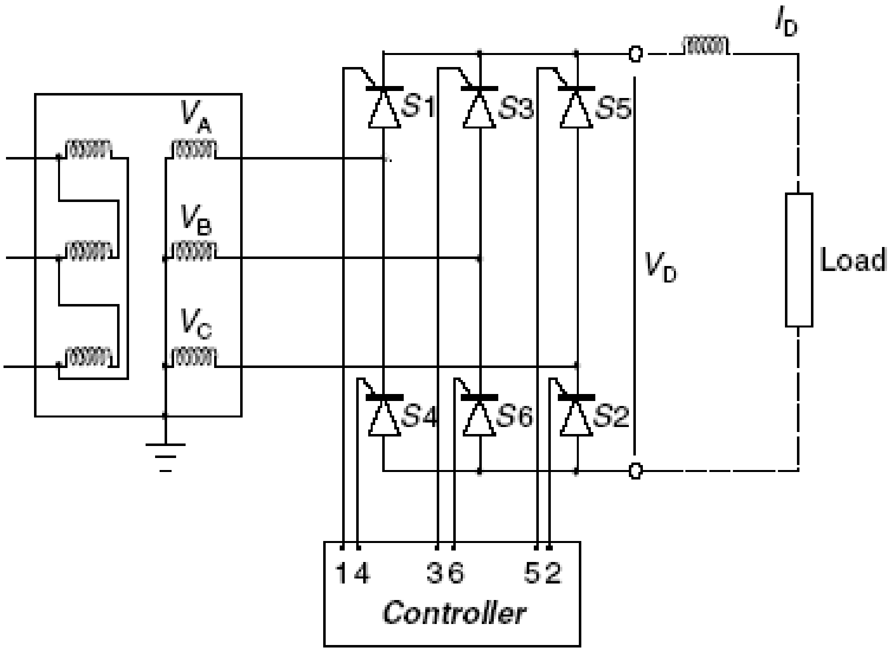
Tegangan searah (DC) output dan sekuens operasional diode rectifier dalam Gambar 5-6, bergantung pada perubahan kontinu tegangan *suplly line* dan tidak bergantung pada rangkaian kontrol. Oleh karena itu, ini dinamakan sebagai diode rectifier bridge tak terkontrol karena output tegangan searah tidak terkontrol dan berharga tetap, yakni 1,35 x Vrms

Jika dioda ini digantikan dengan thyristor, maka terbuka kemungkinan mengontrol suatu titik dimana thyristor diaktifkan dan, dengan demikian, besarnya tegangan output searah dapat dikontrol. Konverter semacam ini dinamakan thyristor rectifier bridge terkontrol. Ini membutuhkan rangkaian kontrol tambahan, untuk mengaktifkan thyristor pada saat yang tepat. Suatu konverter thyristor enam pulsa tipikal diperlihatkan dalam Gambar 5-7..

Berdasarkan bab terdahulu, syarat-syarat yang diperlukan agar suatu thyristor meghantarkan arus dalam suatu rangkaian elektronika daya (*power electronic*) adalah sebagai berikut:

- Tegangan forward harus terdapat pada thyristor
- Suatu pulsa positif harus diberikan terhadap thyristor gate.

Jika masing-masing thyristor diaktifkan sesaat ketika tegangan forward di dalamnya cenderung positif, maka *thyristor rectifier* beroperasi dengan cara yang sama dengan diode rectifier yang diterangkan di atas. Semua gelombang tegangan dan arus dari *diode bridge* juga bekerja pada *thyristor bridge*.




Gambar 5-7. *Thyristor rectifier bridge terkontrol enam pulsa*

Suatu thyristor bridge yang beroperasi seperti ini disebut beroperasi dengan delay angle (sudut penundaan) nol dan memberi output tegangan sebesar:

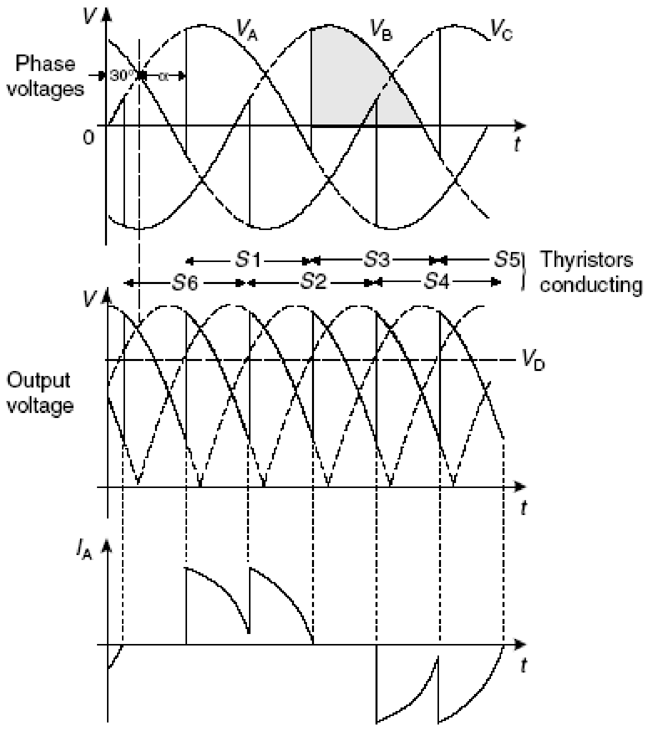
$$V = 1{,}35 \times V_{RMS}$$

Output rectifier bridge dapat dikontrol, dengan menunda waktu sesaat (*instantaneous*) dimana thyristor menerima pulsa pemicu (*triggering pulse*). Penundaan ini biasanya diukur dalam derajat, dari titik dimana tombol tekan dihidupkan, karena tegangan forward menjadi positif. Sudut penundaan ini dinamakan sudut penundaan (*delay angle*), atau kadang-kadang dinamakan *firing angle*, dan ditulis dengan lambang (α). Titik acuan untuk *delay angle* adalah titik dimana suatu gelombang tegangan fase memotong tegangan fase terdahulu dan menjadi positif. Diode rectifier dapat dibayangkan sebagai sebuah konverter dengan *delay angle* = 0 derajat. Tujuan utama pengontrolan suatu konverter adalah mengontrol besarnya tegangan output searah. Umumnya, semakin besar delay angle, semakin kecil tegangan searah. Dibawah operasi dalam keadaan mantap dari suatu sebuah konverter thyristor terkontrol, *delay angle* untuk masing-masing switch adalah sama. Gambar 5-9 memperlihatkan gelombang tgangan, dimana pengaktifan saklar telah ditunda oleh suatu sudut sebesar α derajat.

**Operasi**

Dalam kelompok saklar positif, terminal tegangan searah (DC) positif mengikuti tegangan yang dimiliki saklar, yang dalam konduksi dalam urutan Va-Vb-Vc. Mula-mula diasumsikan bahwa thyristor S1 yang berasosiasi dengan tegangan Va dikonduksikan dan S3 belum diaktifkan. Tegangan pada bus positif pada sisi searah DC mengikuti tegangan Va yang menurun karena, tanpa adanya suatu konduksi S3, masih ada tegangan forward pada S1 dan hal itu akan terus menyebabkan konduksJika suatu S3 diaktifkan (dipicu) sesudah delay angle = α, maka tegangan pada bus positif meloncat menjadi Vb, yang harganya kemudian diikuti. Pada momen instant ini, dimana S1 dan S3 menghantar, suatu tegangan komutansi negatif yang sama dengan Vb-Va terlihat pada S1 selama periode komutasi, yang kemudian mulai mati. Seiring dengan waktu, Vb mencapai puncak sinusoidnya dan kemudian menurun, yang diikuti dengan terminal searah DC positif. Dalam waktu yang bersamaan,

Vc meningkat dan ketika S5 diakifkan, dalam susunan yang sama peristiwa yang sama berulang dan arus dikomutasikan ke S5.




Gambar 5-8. Gelombang tegangan suatu rectifier terkontrol.

Untuk diode rectifier, harga rata-rata tegangan searah dapat dihitung, dengan mengintegrasikan gelombang tegangan dalam periode 120 derajat, yang mewakili suatu bagian berulang dari tegangan searah. Pada *delay angle* α, tegangan searah diberikan oleh persamaan berikut:

$$V_D = 1.35x\ (RMS\,phase - Phase\ Voltage)x\cos\alpha$$

$$V_D = 1.35x\ V_{RMS}x\cos\alpha$$

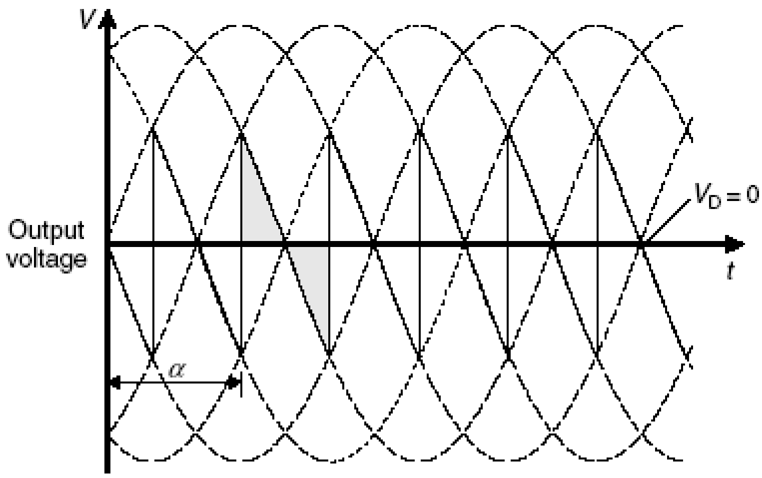
Rumus ini menunjukkan bahwa ouput tegangan teoritis dari thyristor rectifier dengan *firing angle* = 0 sama dengan output tegangan searah untuk diode rectifier. Ini juga menunjukkan bahwa harga rata-rata tegangan searah akan menurun jika *delay angle* bertambah besar dan bergantung pada cosinus delay angle. Bila α = 90 derajat dan cosinus α = 0 dan Vd = 0, yang berarti bahwa harga rata-rata tegangan searah sama dengan nol. Harga sesaat (*instantaneous*) tegangan searah sama dengan

suatu *saw-tooth voltage* (tegangan gigi gergaji), seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 5-9.

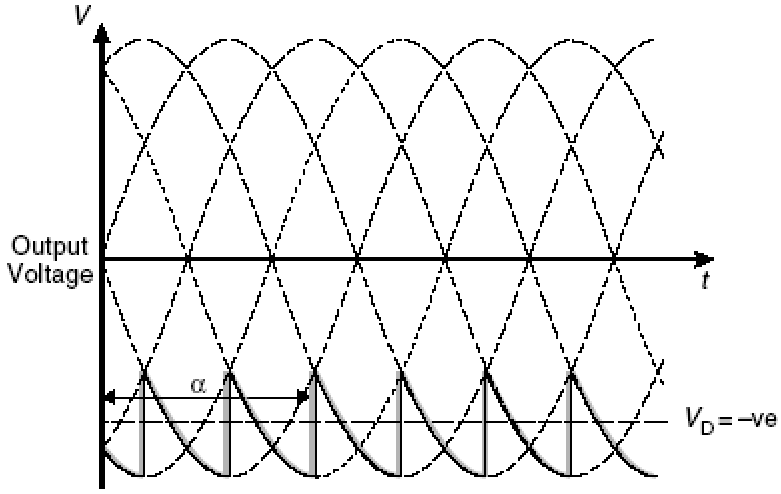
Jika delay angle diperbesar lagi, harga rata-rata tegangan searah menjadi negatif. Dalam operasi semacam ini, konverter beroperasi sebagai inverter. Perlu dicatat bahwa arah arus searah ini tetap tidak berubah karena arus ini dapat mengalir melalui saklar dalam satu arah. Akan tetapi, dengan tegangan searah negatif, arah aliran daya terbalik (*reverse*), dan aliran daya (*power flow*) dari sisi searah ke sisi bolak-balik.

Sebuah operasi keadaan mantap (*Steady satate*) pada mode ini,hanya mungkin, jika ada sumber tegangan di sisi DC, harga *instantaneous voltage* (tegangan sesaat) searah untuk α yang lebih besar dari 90 derajat diperlihatkan dalam Gambar 5-10. Suatu operasi keadaan mantap, dalam mode ini, dimungkinkan hanya jika terapat suatu sumber tegangan pada sisi searah. Harga sesaat tegangan searah untuk α yang lebih besar daripada 90 derajat diperlihatkan dalam Gambar 5-10.

Dalam  praktiknya, komutasi tidak sesaat dan berkesudahan dalam suatu periode yang bergantung pada induktansi rangkaian dan besarnya tegangan komutasi. Seperti dalam kasus yang dikemukakan di atas, kita dapat menaksir waktu komutasi, dari induktansi rangkaian komutasi dan taksiran tegangan komutasi.




Gambar 5-9. Tegangan output DC untuk delay angle = 90 derajat.




Gambar 5-10. *Tegangan output DC ketika delay angle lebih besar daripada 90 derajat.*

Seperti dalam diode rectifier, arus searah keadaan mantap ***Id*** membentuk segmen-segmen arus dari masing-masing tiga fase pada sisi arus bolak-balik. Pada sisi arus bolak-balik. Pada arus bolak-balik, arus pada masing-masing fase terdiri atas blok-blok non-sinusoid, yang mirip dengan blok-blok yang berasosisasi dengan diode rectifier dan dengan konsekuensi-konsekuensi harmonis (*harmonic consequences*) yang sama. Dalam kasus diode bridge, dengan delay angle = 0, sudut antara arus fase dan tegangan fase yang berkorespondensi pada sisi arus bolak-balik hampir sama dengan nol. Akibatnya, faktor daya sama dengan satu dan konverter berfungsi seperti beban resistif.

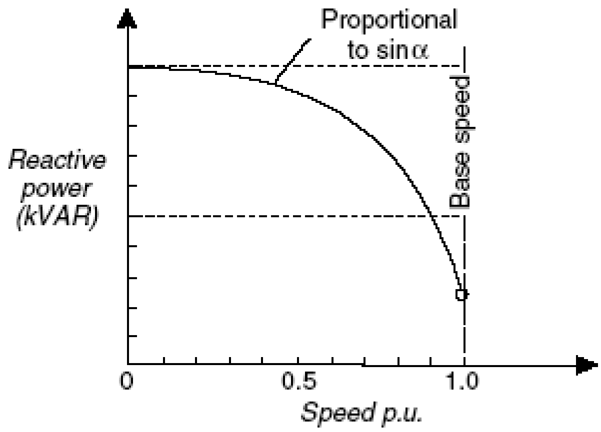
Untuk rectifier terkontrol, dengan delay angle α, sudut antara arus fase dan tegangan fase yang berkorespondensi juga sama dengan α, dan dinamakan sebagai power factor angle (sudut factor daya) ∅. Sudut ini harus dinamakan sebagai faktor displacement karena sudut ini tidak benar-benar mewakili power factor. Akibatnya, bila delay angle thyristor rectifier berubah dan mereduksi tegangan searah, sudut antara arus fase dan tegangan juga berubah dengan besar perubahan yang sama.

Kemudian konverter berperilaku seperti beban resistif-induktif dengan faktor displacement sebesar cosinus ø. Telah diketahui bahwa faktor power yang berasosiasi dengan rectifier terkontrol menurun, dimana tegangan output searah menurun.

Salah satu contohnya adalah pengendali motor searah yang dikontrol oleh *thyristor converter*. Seiring dengan menurunnya tegangan searah, untuk mengurangi laju motor searah, pada torsi konstan, faktor daya menurun dan dibutuhkan daya reaktif yang lebih besar pada sumber jala-jala ke konverter.

| Delay Angle | Converter Behavior |
|---|---|
| $\alpha = 0°$ | Behaves like a *Resistive load* |
| $0° < \alpha < 90°$ | Behaves like a *Resistive/Inductive load* and absorbs active power |
| $\alpha = 90°$ | Behaves like an *Inductive load* with no active power drawn |
| $\alpha > 90°$ | Behaves like an *Inductive load* but is also a **source** of active power |

Seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 5-11, bersamaan dengan menurunnya kecepatan hingga di bawah kecepatan dasar, daya reaktif tetap meningkat.




Gambar 5-11. *Daya reaktif dari suatu pengendali motor searah dengan torsi konstan yang diberi beban (fed) dari konverter komutasi-line*.

**Keterbatasan Praktis Konverter Komutasi-line**

Analisis di atas mencakup aspek-aspek teoritis dari konverter tak terkontrol dan terkontrol. Dalam praktiknya, komponen-komponen ini tidak ideal dan komutasi tidak sesaat (*instantaneous*). Ini menghasilkan deviasi tertentu dari kinerja teoritis. Salah satu deviasi ini adalah bahwa arus beban searah tidak pernah mulus (*smooth*).

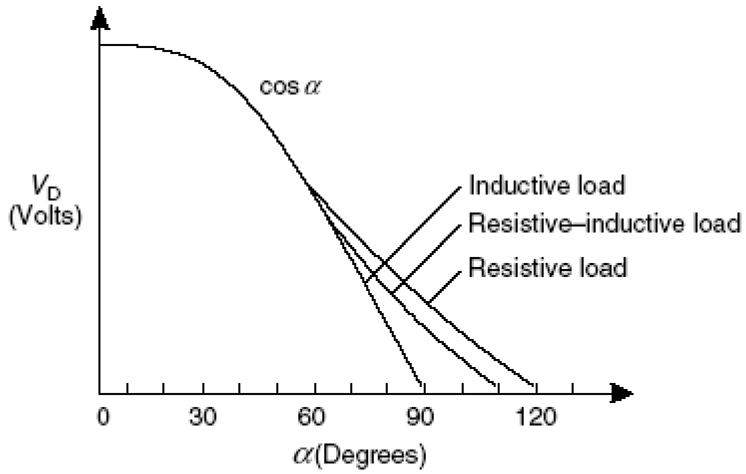
**Penyebab :**

- menerima bahwa tegangan searah sesaat (*instantaneous*) tidak pernah benar-benar mulus, jika beban benar-benar resistif, arus beban searah tidak pernah benar-benar mulus karena arus ini akan mengikuti secara linier tegangan searah.
- Demikian pula, pada delay angle yang lebih besar dari 60 derajat, tegangan output searah menjadi diskontinu dan demikian juga arus searah.

**Perbaikan :**

Dalam upaya mempertahankan suatu arus searah yang mulus, konverter praktis biasanya memiliki induktansi *Ld* secara seri dengan beban pada sisi searah. Untuk benar-benar memuluskan, harga Ld harus tak tentu secara teoritis, yang tentunya tidak praktis.

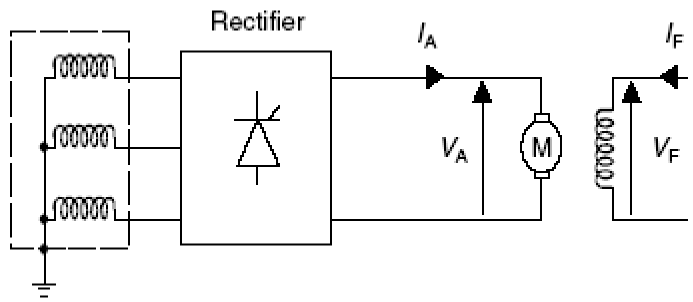
Konsekuensi praktisnya adalah bahwa rumus teoritis untuk harga tegangan searah hasil perhitungan (Vd = 1,35 V rms cosinus α) tidak seluruhnya benar untuk semua harga delay angle. Pengukuran praktis mengkonfirmasi bahwa hal itu benar hanya untuk delay angle hingga 75 derajat, akan tetapi hal ini bergantung pada tipe beban dan khususnya induktansi beban searah. Pengalaman memperlihatkan bahwa untuk sudut delay angle yang lebih besar daripada 60 derajat, tegangan searah rata-rata akan lebih tinggi daripada harga teoritis, seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 5-12.



Gambar 5-12. *Deviasi tegangan searah dari teoritis versus delay angle.*

**Aplikasi untuk Rectifier Komutasi-Line**

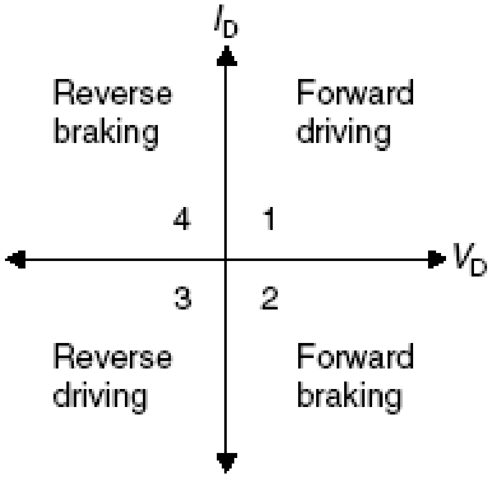
Salah satu aplikasi penting konverter komutasi lini adalah motor drive searah. Gambar 5-13 memperlihatkan suatu konverter komutasi line tunggal terkontrol yang dihubungkan dengan armature suatu motor searah. Konverter ini memberikan suatu tegangan searah berubah terhadap armature motor tersebut. Dengan cara inilah rangkaian kontrol konverter digunakan untuk mengubah kecepatan motor.



Gambar 5-13. *Coverter-fed DC motor drive*.

Apabila *delay angle* lebih kecil daripada 90 derajat, maka tegangan DC positif dan suatu arus *Ia* positif mengalir ke armature motor searah, untuk mengirimkan power aktif ke beban tersebut. Sistem drive ini dikatakan beroperasi pada kuadran pertama (Gambar 5-14), di mana motor bergerak ke arah depan, dengan suatu transfer power aktif dari supply ke motor dan beban mekanisnya.

Jika *delay angle* konverter ditingkatkan ke suatu sudut yang lebih besar daripada 90 derajat, tegangan Vd akan menjadi negatif dan motor akan melambat hingga kecepatan diam. Arus Id juga menurun menjadi nol dan *supply line* dapat diputuskan dari motor tanpa memutuskan arus.



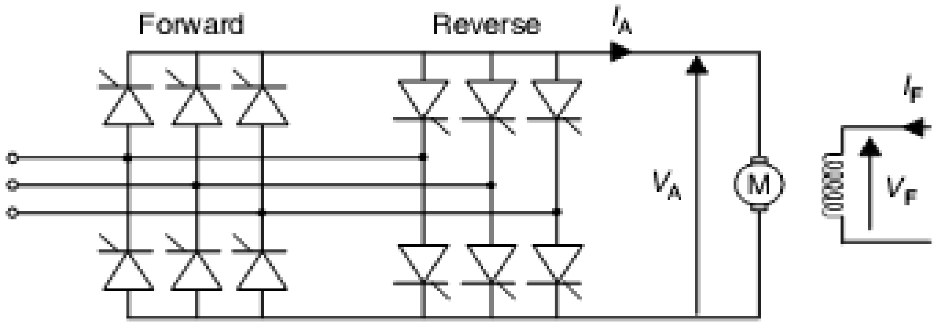

Gambar 5-14. *Kuadran operasi untuk VFD*

Akibatnya, untuk menghentikan motor searah, delay angle harus diperbesar hingga mencapai harga yang leih besar daripada 90 derajat untuk memastikan bahwa tegangan Vd menjadi negatif. Dengan Vd negatif dan Id yang masih positif, konverter berperilaku sesaat seperti sebuah generator dan menghasilkan suatu *braking torque*.

Disamping itu, hal ini berfungsi sebagai suatu brake untuk memperlambat motor dan bebannya dengan cepat ke suatu harga tetap. Dalam situasi ini, drive system disebut beroperasi pada kuadran kedua dimana motor bekerja pada arah forward. Konverter yang dibahas sejauh ini merupakan konverter tunggal, yang hanya bisa beroperasi dengan arus tegangan searah (Id = +ve), yang berarti bahwa motor dapat bekerja hanya pada arah forward tetapi suatu power aktif dapat ditransfer pada dua arah. Konverter searah tunggal hanya bisa beroperasi  dalam kuadran 1 dan kuadran 4 dan  dikenal sebagai konverter kuadran kedua.

**5.5 Penyearah Kuadran Thyristor yang dapat dikontrol.**

Konsep pengoperasian kuadran empat di ilustrasikan pada gambar dibawah ini. Disini menunjukan empat kemungkinan keadaan operasi dari sistem kendali dan menunjukkan arah $V_D$ dan $I_D$ untuk aplikasi pengendali motor DC.




Gambar 5-15. *Penyearah Kuadran-empat*.

Untuk pengoperasian kuadran 3 dan 2, disini harus memungkinkan untuk menbalik arah dari $I_D$. Ini diperlukan tambahan dengan menghubungkan jembatan konverter untuk mengalirkan arus dengan arah yang berlawanan. Jenis konverter ini adalah konverter DC kuadran-empat, dan kadang-kadang disebut penyearah ganda enam pulsa (*double or six-pulse rectifier*) gambar 5-15.

Pengendali motor DC yang disuplai dengan konverter DC kuadran-empat, pengoperasian semua keempat kuadran adalah memungkinkan untuk mengontrol kecepatan serta arah maju dan mundur.

**Operasi**

Perubahan arah putaran motor dapat dengan cepat tercapai. Konverter-1 digunakan sebagai penyearah yang dapat dikontrol untuk mengontrol kecepatan dengan arah putaran maju, dimana konverter-2 memblokir, dan sebaliknya arah mundur,

Dengan asumsi pada awalnya, bahwa motor bekerja pada arah maju, yang dikontrol oleh konverter-1, dengan sudut konduk < $90^0$ dan

konverter-2 memblokir. Perubahan urutan dari arah maju menjadi arah mundur adalah sebagai berikut :

- Sudut konduk konverter-1 naik menjadi $\alpha>90^0$. Ini artinya bahwa tegangan DC $V_D>0$ dan arus DC turun.
- Jika $I_D = 0$, konverter-1 memblokir dan thyristor pemicunya terputus.
- Setelah penundaan sesaat, konverter-2 tidak memblokir dan inverter mulai dengan sudut konduk lebih dari $90^0$.
- Jika motor masih berputar dengan arah maju, arus DC konverter-2 $I_D$ mulai naik pada arah negatif dan mesin DC bekerja sebagai generator, mengembalikan energi ke suplai jala-jala.
- Adapun sudut konduk berkurang menjadi $\alpha<90^0$, konverter-2 berubah dari inverter menjadi penyearah, dan tegangan $V_D$ naik, motor mulai berputar dengan arah berlawanan.

Pada pengendali motor DC, membalik arah putaran dapat juga dilakukan dengan menggunakan konverter tunggal dan dengan merubah arah arus eksitasi.

Metoda ini hanya dapat digunakan dimana persyaratan pengendali tidak dikhususkan untuk merubah dari pengoperasian maju menjadi mundur. Pada kasus ini, menggunakan saklar pada rangkaian medan untuk melakukan perubahan secara mekanik selama pada prioda posisi diam. Makna penundaan waktu selama posisi diam, terhadap demagnetisasi medan pada arah mundur. Pada kebanyakkan aplikasi praktis untuk keduanya tidak dapat dikendalikan dan dikendalikan dengan penyearah *line-commutated*. Beberapa aplikasi dasar terdiri dari :

- Pengendali motor DC dengan *variable speed control*
- Sumber DC untuk *inverter variable voltage-variable frequency*
- Konverter pengembali *slip-energy* untuk motor induksi rotor lilit
- Sumber eksitasi DC untuk mesin DC
- Konverter tegangan tinggi DC

# BAB VI

## INVERTER GATE-COMMUTATED (KONVERTER AC/DC)

***Indikator Keberhasilan:*** *Setelah mengikuti pembelajaran ini siswa diharapkan dapat memahami karakteristik dan prinsip kerja inverter gate-commtated (konverter AC/DC) dengan benar sesuai spesifikasi.*

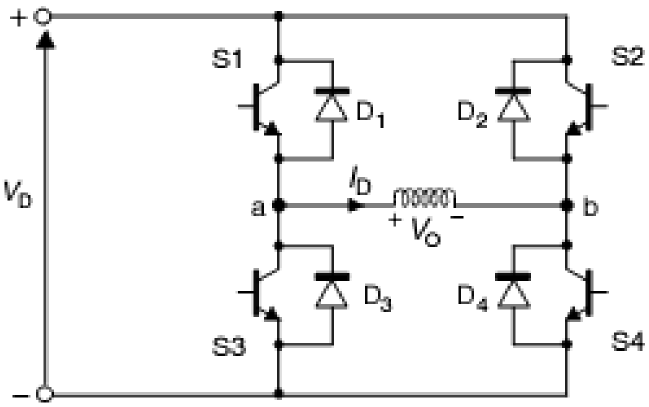
Kebanyakan VSD masa kini dengan batasan 1-500 kW berdasarkan pada peralatan *gate-commutated* seperti *GTO, MOSFET, BJT* dan *IGBT*, yang mana dapat di ON dan OFF dengan rangkaian kontrol daya rendah yang dihubungkan pada gerbang kontrol komponen diatas.

Prinsip operasinya, inverter bekerja pada sumber tegangan DC yang menghasilkan keluaran variabel frekuensi AC. Dapat juga dioperasikan sebagai inverter gelombang langkah atau inverter PWM.
Pada inverter gelombang langkah, transistor sebagai saklar dengan perbedaan phasa $60^0$ dan masing-masing transistor dijaga untuk $180^0$. Variasi output bentuk gelomban frekuensi AC, selama antara transitor berubah menjadi ON. Output tegangan AC bervariasi dengan perubahan tegangan input DC. Inverter jenis ini mempunyai masalah pada torsi pulsa yang menjadi harmonik pada tegangan output. Yang memberikan gerakan pulsa pada rotor dengan kecepatan rendah.

Pulsa torsi dapat dieliminasi dengan menggunakan *pulse width modulation* (PWM) jenis inverter seperti ini outputnya memiliki konten harmonik rendah. Detailnya jenis inverter ini akan dijelaskan pada bab ini. Dengan sumber DC dan saklar elektronika daya, ini tidak memungkinkan didapatkan tegangan sinusiodal murni pada beban. Dengan cara yang lain, ini dapat memungkinkan untuk membangkitkan mendekati arus sinusiodal. Oleh sebab itu, bahwa arus yang mengalir pada rangkaian induktif harus memdekati arus sinusioda yang memungkinkan.

## 6.1 Inverter gelombang kotak satu-phase

Prinsip rangkaian *inverter gate-controlled*, ditunjukan pada gambar 6-1 yang terdiri dari empat semikonduktor daya yang mensuplai beban induktif.




Gambar 6-1. *Inverter AC.*

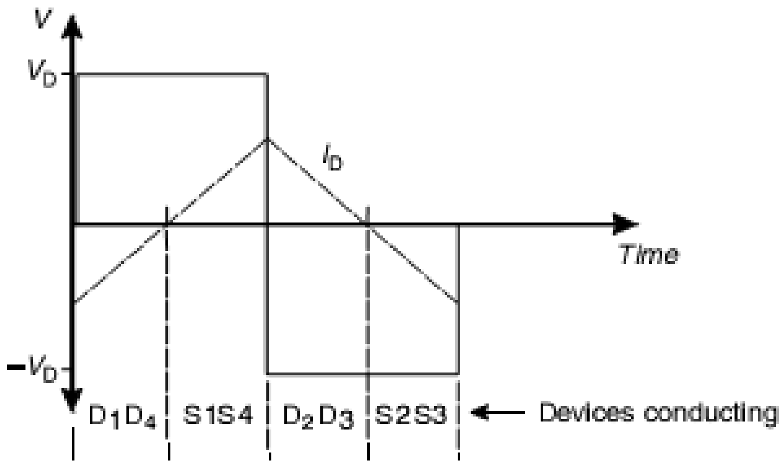
Rangkaian ini dapat dianggap sebagai sakalar elektronik balik, yang mana tegangan DC input dapat dihubungkan pada beban induktif dengan cara sebagai berikut :

1. S1 = on, S4 = on ..... memberikan + $V_D$ pada beban
2. S2 = on, S3 = on ..... memberikan – $V_D$ pada beban
3. S1 = on, S2 = on ..... memberikan tegangan nol pada beban
4. S3 = on, S4 = on ..... memberikan tegangan nol pada beban
5. S1 = on, S3 = on ..... memberikan kesalahan hubung singkat
6. S2 = on, S4 = on ..... memberikan kesalahan hubung singkat

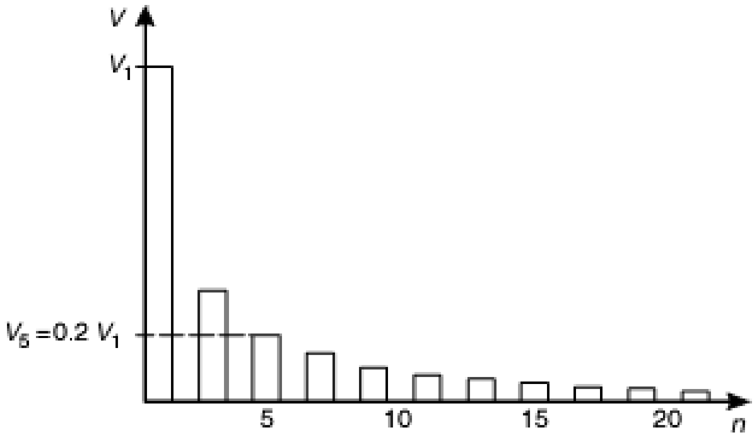
Walaupun demikian, keempat saklar dapat dikontrol untuk memberiakan bentuk gelombang kotak pada beban induktif, seperti yang ditunjukan pada gambar 6-1. Disini menggunakan konfigurasi pensaklaran (1) dan (2), tetapi bukan konfigurasi (3) atau (4). Secara jelas, untuk keselamatan pengoperasian yang berkelanjutan, opsi ke (4) harus selalu dihindari. Pada kasus ini secara murni beban induktif, bentuk gelombang arus adalah bentuk gelombang segitiga, seperti yang ditunjukan pada gambar 6-2.

Pada bagian pertama siklus, arus negatif melalui saklar S1 dan S4 yang terhubung. Sebab kebanyakan komponen elektronika daya tidak dapat konduk secara negatif, untuk menghindari bahaya pensaklaran, arus negatif ini akan dialihkan.

Oleh sebab itu, biasanya dipakai dioda, anti paralel dengan pensaklaran untuk mengalirkan arus terus. Dioda tersebut kadang-kadang disebut reaktif atau *freewheeling* dioda. Dioda tersebut konduk jika polaritas tegangan dan arus berlawanan. Ini akan mengakibatkan jika arah-mundur aliran daya kembali ke sumber tegangan DC. Output frekuensi gelombang kotak priodik disebut frekuensi dasar. Menggunakan analisis *Fourier*, beberapa bentuk gelombang berulang-ulang dapat ditetapkan kedalam jumlah bentuk gelombang sinusiodal. Masing-masing mencakup satu sinusiodal pada frekuensi dasar dan jumlah harmonik sinusiodal pada frekuensi tinggi, yang mana lebih dari satu frekuensi dasar. Spektrum harmonik untuk output gelombang kotak seperti yang ditunjukan pada gambar 6-3. Dengan menaikan frekuensi, amplitude tegangan harmonik turun dengan cepat.




Gambar 6-2. *Modulasi bentuk gelombang kotak.*




Gambar 6-3. *Spektrum harmonik gelombang kotak*.

Nilai RMS komponen tegangan sinusiodal dasar adalah :

$$V_1 = 2\frac{\sqrt{2}}{\pi}V_d \quad V$$

Nilai RMS n tegangan harmonik :

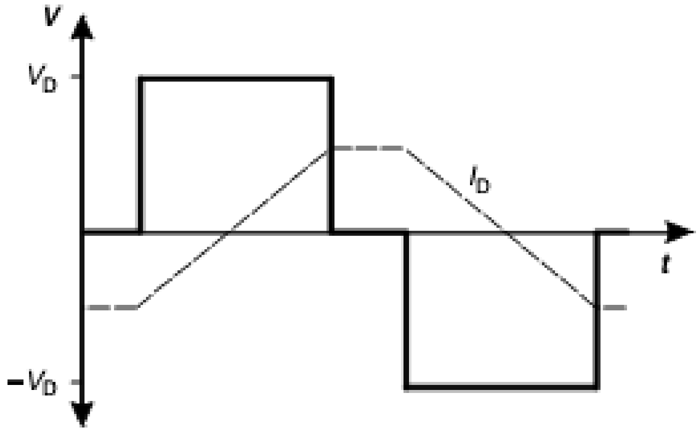
$$V_n = \frac{V_1}{n} \qquad V$$

Dari ilustrasi ini bahwa output tegangan gelombang kotak, mempunyai banyak komponen yang belum diketahui seharusnya magnitude yang besar pada frekuensi dasar. Arus yang mengalir pada beban yang disebabkan oleh distorsi tegangan output, sebagaimana yang didemontrasikan oleh bentuk gelombang arus non-sinusiodal. Contoh ini, arus yang memiliki bentuk segitiga.

Jika tegangan gelombang kotak yang ditunjukan terhadap motor induksi satu phasa, motor akan bekerja pada frekuensi gelombang kotak. Keadaan komponen linier (induktif/resistif beban), bagaimanapun juga, ini akan tergambar arus non-sinusiodal dan akan menahan penambahan panas yang diakibatkan arus harmonik. Arus tersebut dapat juga membangkitkan pulsa torsi. Untuk merubah kecepatan motor, frekuensi dasar dari output inverter dapat dirubah dengan mengatur pensaklaran kecepatan. Untuk menaikan frekuensi, pensaklaran kecepatan dapat

dinaikan, dan untuk menurunkan frekuensi, pensaklaran kecepatan dapat diturunkan.

Magnitude tegangan output dapat juga dikontrol. Tegangan output inverter rata-rata dapat diturunkan dengan memasukan prioda tegangan nol, menggunakan saklar konfigurasi (3). Masing-masing setengah siklus yang terdiri dari pulsa kotak, yang hanya sebagian dari setengah prioda, seperti yang ditunjukan dalam gambar 6-4.




Gambar 6-4. *Modulasi gelombang kotak dengan pengurangan lebar tegangan pulsa.*

Proses perubahan lebar pulsa, untuk mengurangi nilai rata-rata RMS dari bentuk gelombang disebut PWM. Contoh gambar 6-24 phasa tunggal, PWM memungkinkan untuk mengontrol nilai RMS tegangan output. Komponen dasar tegangan sinusiodal adalah secara kontinue berubah dengan batasan sebagai berikut :

$$Zero - 2\frac{\sqrt{2}}{\pi}V_D \qquad V$$

Spektrum harmonik disini bentuk gelombang dimodifikasi tergantung dari bagian dari pulsa tersebut, gelombang kotak penuh, tetapi secara umum sama dengan bentuk gelombang yang ditunjukan sebelumnya.

### 6.2 Inverter modulasi lebar pulsa (PWM) phasa tunggal

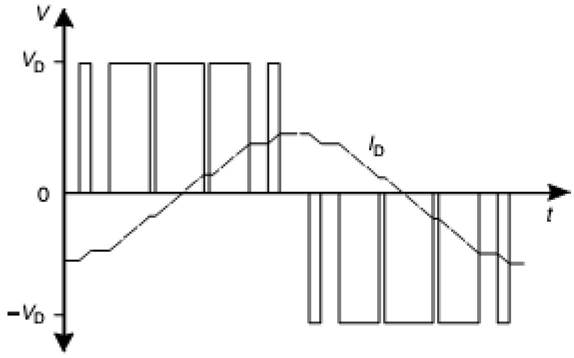
Berdasarkan fakta bahwa sumber tegangan stator pada motor induksi AC, adalah gelombang kotak dan ini menimbulkan distorsi dengan sendirinya terhadap motor. Masalah utama datang dari distorsi bentuk gelombang arus, yang menghasilkan kerugian tembaga dan mengakibatkan denyutan torsi pada poros motor. Salah satu output inverter yang ideal, menghasilkan bentuk gelombang arus pada distorsi harmonik yang rendah.

Motor induksi AC secara dominan adalah induktif, dengan reaktansi tergantung pada frekuensi ($X_L=j2\pi fL$). Disini, oleh sebab itu, bermanfaat jika distorsi tegangan harmonik dapat mendesak kedalam frekuensi tinggi, dimana impedansi motor tinggi dan tidak banyak arus distorsi yang akan mengalir.

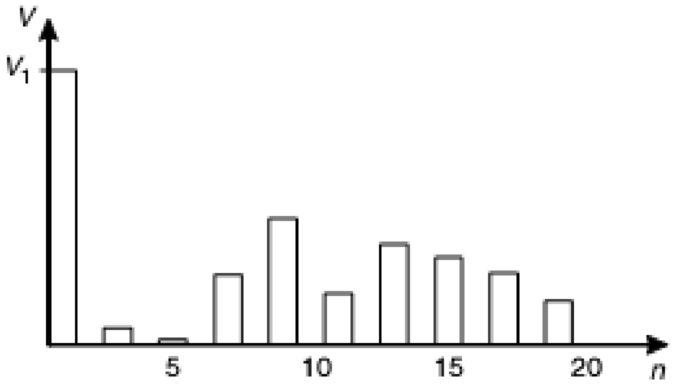
Salah satu teknik untuk merealisasikan ini adalah modulasi pelebaran pulsa kode sinus (sine-PWM). Peralatan daya yang diperlukan sebagai pensaklaran, pada frekuensi tertentu harus lebih besar dari frekuensi dasar, yang menghasilkan sejumlah pulsa, untuk masing-masing bagian prioda output yang dihendaki. Pulsa dari suatu frekuensi disebut frekuensi modulasi.

Lebar pulsa berbeda untuk seluruh siklus sinusioda, menghasil bentuk gelombang tegangan seperti yang ditunjukan pada gambar 6-5, pada gambar tersebut juga ditunjukan bentuk gelombang arus untuk beban induktif, dengan peningkatan bentuk gelombang.

Peningkatan bentuk gelombang arus dapat dijelaskan dengan spektrum harmonik seperti yang ditunjukan pada gambar 6-6. Dari sini dapat kita lihat bahwa, bentuk gelombang tegangan seluruhnya masih banyak komponen distrosi, terjadi frekuensi harmonik yang tinggi, dimana beban impedansi yang tinggi pada motor efektif untuk menurunkan arus.




Gambar 6-5. *Tegangan dan arus PWM kode sinus*

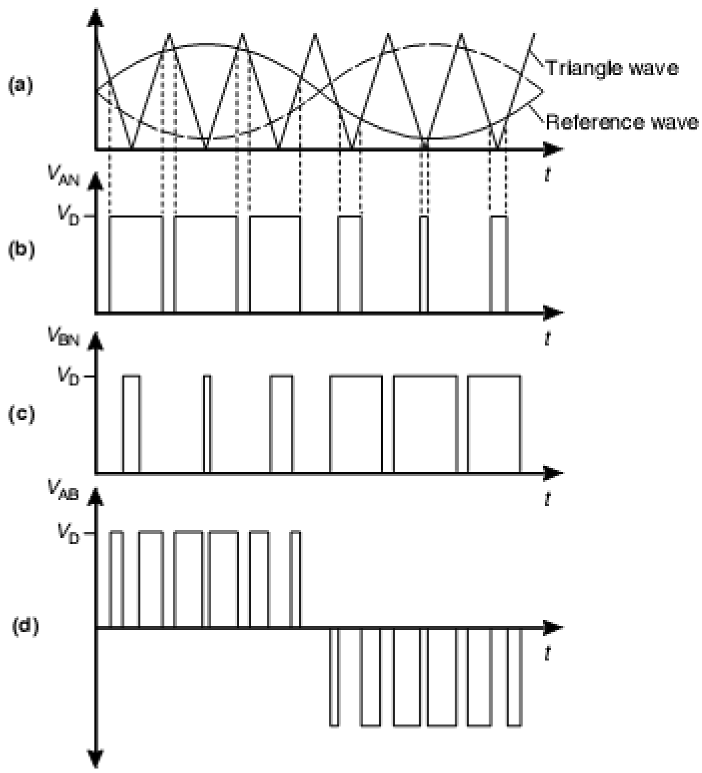



Gambar 6-6. *Spektrum harmonik untuk inverter PWM.*

Kenaikan modulasi frekuensi akan memperbaiki bentuk gelombang arus, tetapi kerugianya pada pembiayaan peralatan pensaklaran inverter naik, pemilihan frekuensi modulasi tergantung pada jenis peralatan pensaklaran dan frekuensi. Dengan *inverter thyristor force-commutated*, frekuensi modulasi frekuensi naik menjadi 1 kHz adalah memungkinkan dengan menggunakan teknologi lama. Dengan dikenalkannya GTOs dan BJTs, dapat dinaikan sekitar 5 kHz. Dengan IGBTs, frekuensi modulasi akan menjadi tinggi sampai 20 kHz.

Pada prakteknya, modulasi frekuensi maksimum diatas 12 kHz berdasarkan pada inverter IGBT kira-kira ukuran motor 22 kW dan 8 kHz untuk motor 500 kW. Pemilihan modulasi frekuensi didasarkan pada kerugian antara motor dan inverter. Pada modulasi frekuensi rendah, kerugian pada inverter rendah dan pada motor tinggi. Pada modulasi frekuensi, kerugian pada inverter naik, dimana pada motor turun.

Salah satu teknik dasar untuk merealisasikannya inverter PWM kode sinus merupakan metoda persilangan sinus-segitiga seperti yang diperlihatkan pada gambar 6-7. Bentuk gelombang segitiga gigi gergaji dibangkitkan dari rangkaian kontrol yang dikehendaki pada inverter pensaklaran frekuensi. Disini merupakan perbandingan pada suatu komparator, dengan acuan sinyal sinusioda, yang mana sama dengan frekuensi dan sebanding dengan magnitudenya bahwa tegangan output sinusioda sesuai dengan yang dikehendaki. Tegangan $V_{AN}$ (gambar 6-7b) pesaklaran cepat kapanpun acuan bentuk gelombang lebih bagus bentuk gelombang segitiga. Tegangan $V_{BN}$ (gambar 6-7c) tidak dapat dikontrol dengan bentuk gelombang segitiga yang sama tetapi dengan penggeseran bentuk gelombang $180^0$.




Gambar 6-7. *Prinsip PWM dengan segitiga persilangan*.

Pada kenyataannya tegangan output phasa ke phasa adalah $V_{AB}$ (gambar 6-7d), yang mana perbedaan antara $V_{AN}$ dan $V_{BN}$, terdiri dari pulsa seri, masing-masing memiliki lebar yang berhubungan terhadap nilai acuan gelombang sinus pada waktu tertentu. Jumlah pulsa tegangan output $V_{AB}$ adalah dua kali lipat tertinggal dari tegangan $V_{AN}$.

Contoh pensaklaran inverter 5 kHz harus membangkitkan distorsi pensaklaran pada 10 kHz dengan tegangan output phasa ke phasa. Polaritas tegangan secara alternatif positif dan negatif pada frekuensi output yang dikehendaki.

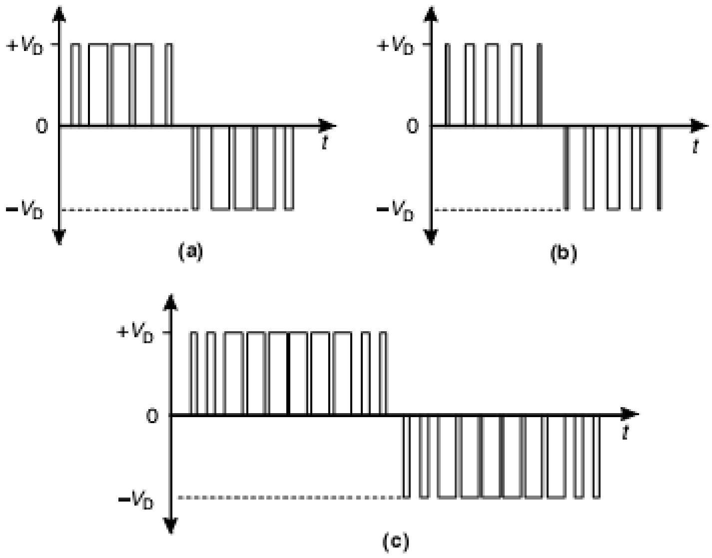
Disini dapat pula dilihat bahwa acuan gelombang sinus pada gambar 6-7 merupakan komponen DC yang diberikan bahwa pulsa yang dibangkitkan dengan teknik mempunyai lebar positif. Ini ditunjukan dengan masing-masing tegangan DC yang tertinggal seperti yang ditunjukan pada gambar 6-7a dan c. Bagaimanapun juga, masing-masing ketertinggalan sama dengan tegangan DC yang menghilang dari tegangan beban.

Teknik dengan menggunakan segitiga-sinus persilangan adalah secara khusus sesuai untuk rangkaian kontrol analog, dimana dua acuan bentuk gelombang merupakan sumber pada komparator dan output komparator yang digunakan sebagai pemicu pensaklaran inverter. Pengoperasian secara teknik digital masa kini yang didasarkan pada algoritma pensaklaran. Contoh dengan membangkitkan pulsa pemicu yang proporsional terhadap bagian bawah gelombang sinus.

Akhir-akhir ini, pabrikan telah mengembangkan sejumlah perbedaan alogoritma untuk mengoptimalkan penampilan bentuk gelombang output pada motor induksi AC. Teknik tersebut menghasilkan output bentuk gelombang PWM, yang sama seperti yang ditunjukan pada gambar 6-7. Bentuk gelombang tegangan PWM kode-sinus adalah gabungan gelombang kotak frekuensi tinggi pada pulsa frekuensi (pembawa pensaklaran) dan variasi lebar sinusioda (modulasi bentuk gelombang). Disini dapat diketahui bahwa, untuk distorsi harmonik yang rendah, modulasi bentuk gelombang harus sinkron dengan frekuensi pembawanya, sehingga terdiri dari sejumlah integral prioda pembawa.

Ini diperlukan menjadi sedikit penting dengan frekuensi pembawa yang tinggi lebih dari dua puluh kali modulasi frekuensi. Tegangan dan frekuensi bentuk gelombang PWM sinusioda merupakan variabel

perubahan bentuk gelombang acuan pada gambar 6-7a, output yang dihasilkan seperti yang ditunjukan pada gambar 6-8.




Gambar 6-8. *Variasi frekuensi dan tegangan dengan PWM sinusioda*.

Gambar 6-8a menunjukan kasus dasar, dengan nilai perbandingan V/f. Gambar 6-8b menunjukan kasusu dimana tegangan acuan setengahnya, menghasilkan masing-masing pulsa setengahnya. Gambar 6-8c menunjukan kasus dimana frekuensi acuan setengahnya, menghasilkan pelebaran modulasi lebih dari dua kali sejumlah pulsa.

Besar tegangan dengan PWM kode sinus terjadi bila pulsa ditengah melebar, menghasilkan output dengan tegangan puncak sama dengan sumbernya.

**Indek Modulasi**

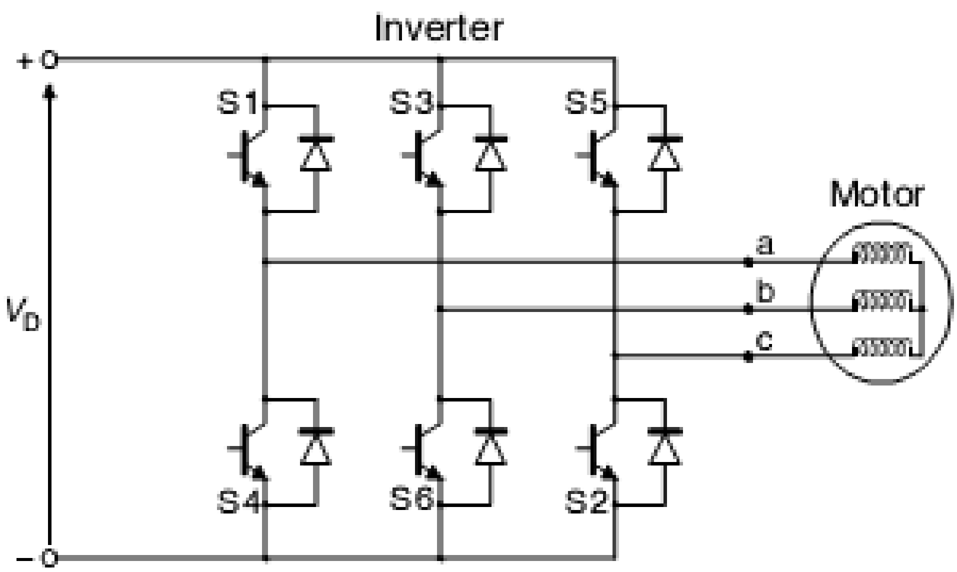
Disini mendifinisikan perbandingan AC puncak output dengan sumber DC. Jadi, besarnya tegangan output terjadi bila indek modulasi 1.

Ini memungkinkan dapat mencapai nilai indek modulasi tinggi dengan mengabaikan PWM sinus dan dengan menambahkan beberapa distrosi terhadap tegangan sinusioda acuan. Hasilnya beberapa pulsa ditengah-tengah bagian positf dan negatif bentuk gelombang tereliminasi. Proses ini disebut pengurangan pulsa. Batasannya, tegangan bentuk gelombang kotak dapat dicapai dengan indek modulasi 1.

## 6.3 Inverter Tiga Phasa

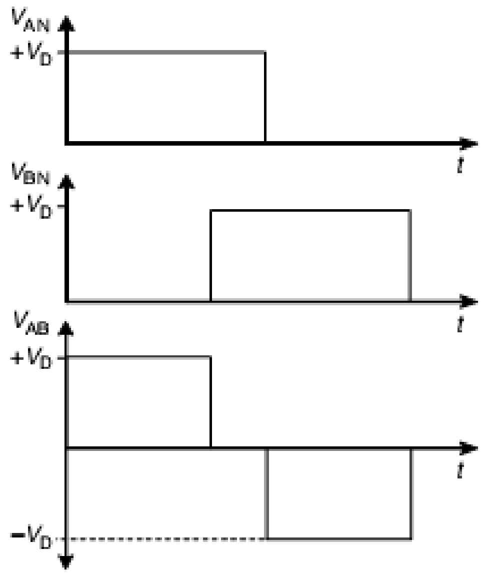
Inverter tiga phasa harus dibangun dari jenis tiga inverter seperti yang ditunjukan sebelumnya. Bagaimanapun juga, lebih ekonomis menggunakan inverter jembatan enam-pulsa seperti yang ditunjukan pada gambar 6-9.

Bentuk sedehana seperti ini, tegangan output bentuk gelombang kotak dapat diperoleh dengan pensaklaran pada masing-masing untuk setengah prioda dan untuk setengah prioda berikutnya, pada saat waktu yang bersamaan dipastikan bahwa masing-masing phasa bergeser sepertiga prioda ($120^0$), seperti yang ditunjukan pada gambar 6-10.




Gambar 6-9. *Inveret tiga phasa menggunakan gate-controlled switches*.

Bentuk gelombang tegangan phasa ke phasa yang dihasilkan terdiri dari pulsa kotak seri yang melebar merupakan dua-tiga priode pensaklaran, pada masing-masing phasa.



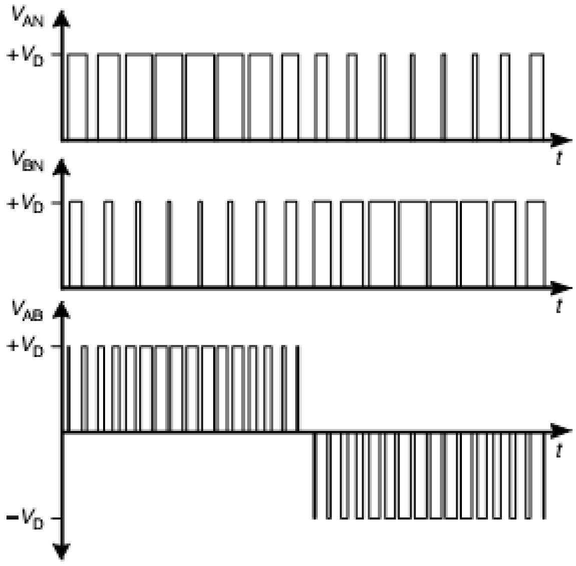

Gambar 6-10. *Output modulasi gelombang kotak-kuasi*.

Bentuk gelombang tegangan yang dihasilkan disebut tegangan gelombang kotak-kuasi (*quasi-square wave*). Teknik sederhana ini telah digunakan sebagai sumber tegangan inverter (*voltage source inverter*), dengan menggunakan *force commutated thyristor* pada inverter jembatan. Untuk menjaga perbandingan V/f tetap, magnitude tegangan DC pada penyearah dikontrol, selain itu menetapkan perbandingan frekuensi output, yang dikontrol dengan inverter jembatan. Teknik ini juga diketahui sebagai *pulse amplitude modulation* (PAM).

Tegangan ouput konverter tiga phasa mempunyai spektum harmonik, sama dengan gelombang kotak satu-phasa, terkecuali bahwa harmonik ketiga (harmonik yang frekuensinya tiga kali frekuensi dasar) telah dihapus. Pada inverter dengan output tiga-phasa, yang berarti bahwa harmonik ke 3, ke 9, ke 15, ke 21 dst dihapus. Untuk membangkitkan tegangan output AC tiga-phasa pada frekuensi yang spesifik, tegangan $V_{AN}$, $V_{BN}$, $V_{CN}$ pada ketiga terminalo utput a, b, dan c gambar 6-9 dapat dimodulasi dengan mengontrol on dan off keduanya tegangan dan frekuensi.

Perbandingan lebar pulsa yang melebihi prioda dapat berubah menurut algoritma PWM kode-sinus (gambar 6-11).

Bila tegangan phasa phasa $V_{AB}$ terbentuk, menunjukan trategi modulasi yang diberikan hanya pada pulsa positif untuk setengah prioda dilanjutkan dengan pulsa negatif untuk setengah prioda, kondisi ini diketahui sebagai polaritas pulsa tetap. Ini dapat menunjukan bahwa polaritas pulsa tetap menjamin rendahnya distorsi harmonik, kebanyakan distorsi dimulai pada pemotongan kedua frekuensi inverter. Oleh karena itu, jenis inverter ini digunakan pada aplikasi industri. Metoda yang sama juga digunakan pada pengendali AC.




Gambar 6-11. *Bentuk gelombang tegangan output PWM kode-sinus tiga phasa.*

# BAB VII

## PROTEKSI DAN DIAGNOSA SECARA MENYELURUH

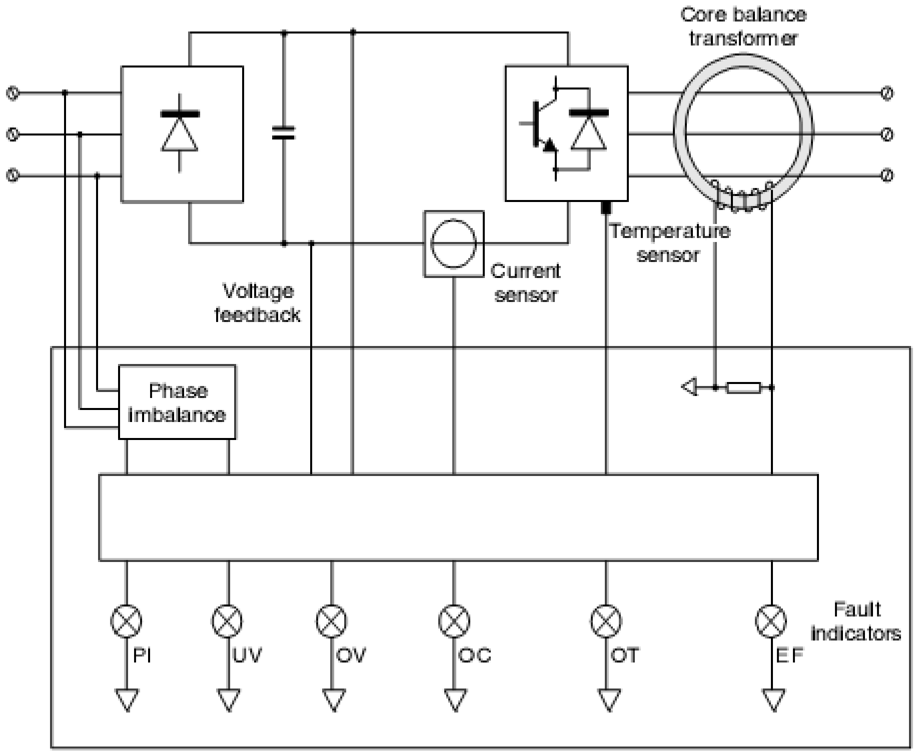
***Indikator Keberhasilan:*** *Setelah mengikuti pembelajaran ini siswa diharapkan dapat memahami karakteristik dan prinsip kerja proteksi dan diagnosa secara keseluruhan dengan benar sesuai spesifikasi.*

Gambar 7-1 adalah rekapitulasi dari fitur proteksi secara dasar yang digunakan pada konverter AC PWM digital masa kini. Sebagai rangkuman, kebanyakan fungsi proteksi diimplementasikan pada perangkat lunak, menggunakan algoritma yang sesuai. Yang utama khususnya merupakan proteksi arus lebih dan proteksi kesalahan pembumian. Hal tersebut diimplementasikan dalam perangkat keras, untuk meyakinkan bahwa secara cepat melindungi peralatan semikonduktor daya.

Pada fitur proteksi yang normal tersedia pada inverter dasar VFD yang merupakan ketidak seimbangan phasa, tegangan kurang, tegangan lebih, arus lebih, temperatur lebih dan kesalahan pembumian. Fitur proteksi mensyaratkan, sensor trafo arus dan tegangan, dan sensor temperatur. Ini terpasang dan mengindikasikan suatu persyaratan untuk yang sama.

### 7.1 Informasi operator dan diagnosa kesalahan

VFD digital masa kini semuanya mempunyai bentuk sama pada modul antarmuka operator. Modul ini menyediakan akses terhadap data internal, tentang pengontrolan dan status parameter selama pada pengoperasian dan informasi diagnosa selama kondisi kesalahan. Modul seperti ini disebut *human interface module* (HMI). HMI biasanya dilengkapi dengan tampilan LED atau LCD dan tombol tekan mengintrograsi rangkaian kontrol. Antar muka operator ini dapat juga digunakan dan merubah pengesetan parameter VFD.




Gambar 7-1. *Contoh blok diagram proteksi VFD*.

Jika terjadi kesalahan *internal* atau *external*, register rangkaian kontrol akan menentukan jenis kesalahan. Ini membantu untuk mengidentifikasi penyebab kesalahan dan pebaikan yang diperlukan selanjutnya. Konverter *microprocessor-controlled modern* memakai sistem diagnosa. Kedua sistem monitor, kondisi operasi internal dan ekternal dan menanggapi kesalahan. Ini dapat dilakukan dengan cara pemerograman oleh pengguna. Sistem kontrol menyimpan informasi kesalahan pada memori untuk dianalisa selanjutnya. Fitur ini diketahui sebagai diagnosa kesalahan.

Terdapat tiga tingkatan utama pada informasi operator dan diagnosa kesalahan pada model yang diandalkan, sebagai berikut :

- Tingkatan pertama menyediakan informasi tentang situasi yang sedang berjalan didalam VFD. Rujukan ini yang utama untuk mengeset parameter dan parameter operasi *real-time*. Informasi ini untuk mengukur, seperti tegangan output, arus output, frekuensi output dan seterusnya.

- Tingkatan kedua menyediakan diagnosa informasi, tentang status dari rangkaian proteksi, dan indikator kesalahan ekternal, seperti yang diuraikan dibawah ini.
- Tingkatan ketiga menyediakan diagnosa informasi tentang status kesalahan internal, seperti identifikasi model kesalahan. Menunujukan diagnosa internal biasanya hanya ditemukan pada VFD yang memiliki kemampuan tinggi.

Tabel 7-1 adalah daftar singkat jenis parameter dan kondisi kesalahan.

| Module | Parameters and Fault Diagnostics |
|---|---|
| Power supply | Power supply voltage, current, and frequency |
| DC bus | DC link voltage and current |
| Motor | Output voltage, current, frequency, speed, torque, temperature |
| Control signals | Set point, process variable, error, ramp times |
| Status | Protection circuits, module failures, internal temps, fans running, switching frequency, current limit, motor protection, etc. |
| Fault conditions | Power device fault, power supply failed, driver circuit failed, current feedback failed, voltage feedback failed, main controller failed |

Pada tingkatan pertama, kebanyakan VFD digital moderen menyediakan informasi tentang status sebagai berikut :

- Semua pengesetan parameter ditentukan kondisi operasi.
- Digital input (DI) dan digital output (DO), seperti *start*, *stop*, *enabled*, *jog*, *forward/reverse*, dst.
- Status analog input (AI), seperti acuan kecepatan, acuan torsi, dst
- Parameter operasi real-time, yang meliputi deretan informasi yang luas, seperti frekuensi output, tegangan output, arus output, dst

Pada tingkatan kedua, jika kesalahan terjadi dan VFD berhenti, diagnosa informasi menyediakan untuk membantu pembetulan kesalahan, dengan cara demikian mengurangi waktu berhenti (*downtime*). Hal ini selalu tumpang tindih antara tingkatan diagnostik. Contoh, bertepatan dengan arus lebih dengan tidak ada hubungan motor yang dapat mengindikasikan kesalahan pada peralatan pensaklaran elektronika daya didalam konverter.

Tabel 7-2 menunjukan dasar-dasar indikasi kesalahan ekternal yang disediakan oleh sistem diagnosa VFD, dan beberapa kemungkinan masalah ineternal atau eksternal sebagai penyebabnya.

Tabel 7-2 : Tabel diagnostik VFD

| Protection | Internal Fault | External Fault |
|---|---|---|
| Over-voltage | Deceleration rate set too fast | Mains voltage too high<br>Transient over-voltage spike |
| Under-voltage | Internal power supply failed | Mains voltage too low<br>Voltage sag present |
| Over-current | Power electronic switch failed<br>Driver circuit failed | Short-circuit in motor or cable |
| Thermal overload | Control circuit failed | Motor overloaded or stalled |
| Earth fault | Internal earth fault | Earth fault in motor or cable |
| Over temperature | Cooling fan failed<br>Heat sink blocked | Ambient too high<br>Enclosure cooling blocked |
| Thermistor trip | | Motor thermistor protection |

Sistem inetrnal diagnosa dapat memberikan informasi pada operator tentang kesalahan yang terjadi didalam pengendalinya. Fitur ini dapat menerobos kedalam kondisi kesalahan, seperti kesalahan pada peralatan output, kesalahan komunikasi, dst. Kondisi kesalahan merupakan indikasi bahwa modul tertentu atau peralatan telah terjadi kesalahan atau pengoperasiannya tidak normal.

Untuk memonitor kondisi kesalahan, pengendalinya harus secara spesifik dirancang termasuk rangkaian diagnosa kesalahan internal. Contoh, pengendali daya semikonduktor termasuk rangkaian untuk mengukur saturasi tegangan, yang mana tegangan pada peralatan jika dihubungkan, untuk masing-masing daya semikonduktor. Ini dapat mengidentifikasi hubung singkat pada pensaklaran daya dan VFD dapat berhenti sebelum terjadi arus lebih eksternal atau sikring dapat beroperasi.

Biaya dan upaya signifikan diperlukan untuk mengimplementasikan monitoting kondisi kesalahan internal. Hanya beberapa VFD dengan

penampilan tinggi menyediakan diagnostik internal secara luas. Fitur ini sangat bermanfaat untuk menentukan letak gangguan (*troubleshooting*), tetapi disini biasanya hanya dijamin bila berhenti yang menyatakan pembiayaan merupakan bagian utama terhadap pengguna.

# BAB VIII

## PENGINSTALAN DAN KOMISIONING

***Indikator Keberhasilan:*** *Setelah mengikuti pembelajaran ini siswa diharapkan dapat memahami karakteristik dan prinsip kerja proteksi dan diagnosa secara keseluruhan dengan benar sesuai spesifikasi.*

### 8.1 Panduan umum penginstalasian

**Persyaratan lingkungan**

Konverter *VVVF AC* elektronika daya moderen, yang digunakan untuk mengontrol kecepatan motor listrik, biasanya sebagai pensuplai unit yang berdiri sendiri menurut konfigurasinya. Pertama konfigurasi dasar :

- *IP00* : dirancang untuk pemasangan rangka pada penggunaan biasanya sebagai bagian dari MCC.
- *IP20/IP30* : dirancang untuk dipasang pada lingkungan yang bersih, seperti tahan cuaca, ruangan yang dilengkapi dengan alat pengkondisian udara. Lingkungan harus bebas dari debu, kelembaban dan kontaminasi. Temperatur harus dijaga dengan batasan yang spesifik.
- *IP54* : dirancang untuk pemasangan diluar secara parsial pelindung pada lingkungan, mungkin berdebu dan lembab.

**Kondisi lingkungan untuk penginstalan**

Keuntungan utama suatu AC VSD adalah bahwa bila menggunakan beban berupa motor rotor sangkar pada hakekatnya diproteksi dari kondisi lingkungan yang tidak bagus dan ini biasanya dibatasi pada *IP54* atau lebih baik. Ini dapat dengan handal digunakan pada lingkungan yang berdebu atau lembab.

Dari sisi lain, konverter AC sangat sensitif terhadap lingkungan dan harus dilokalisir dalam lingkungan tertentu yang diproteksi dari faktor-faktor sebagai berikut :

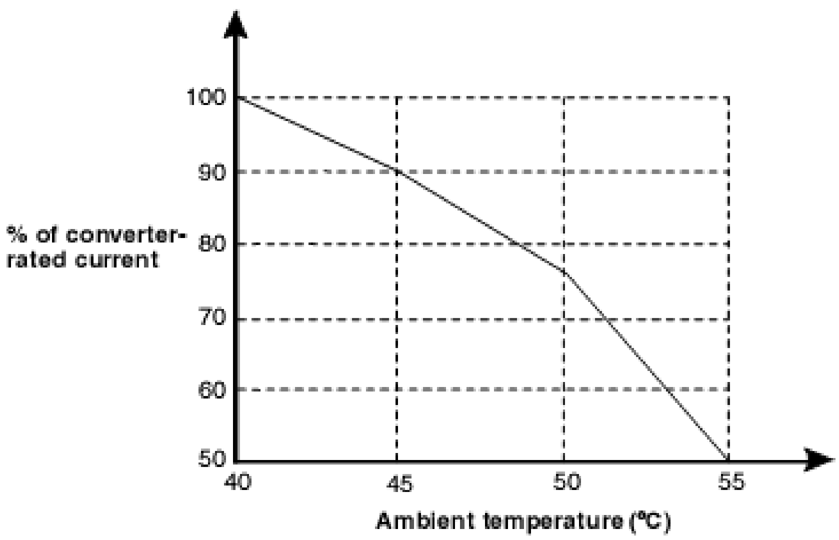
- Debu dan bahan abrasi yang lainya
- Gas dan cairan korosi
- Gas dan cairan yang mudah terbakar
- Kelembaban tingkat tinggi

Jika menginstal konverter AC, batasan-batasan lingkungan harus dipertimbangkan :

- Temperatur sekitar yang spesifik : <40$^0$C
- Ketinggian yang spesifik : <1000 m diatas permukaan laut
- Kelembaban relatif : <95%

**Batasan untuk temperatur**

Di lingkungan setempat dimana ketinggian temperatur, melebihi temperatur 40$^0$C, kedua motor dan konverter harus memenuhi batasan tertentu. Artinya bahwa hal tersebut hanya dapat bekerja pada beban kurang dari 40$^0$C, untuk menghidari panas yang berlebihan terhadap bahan isolasi.

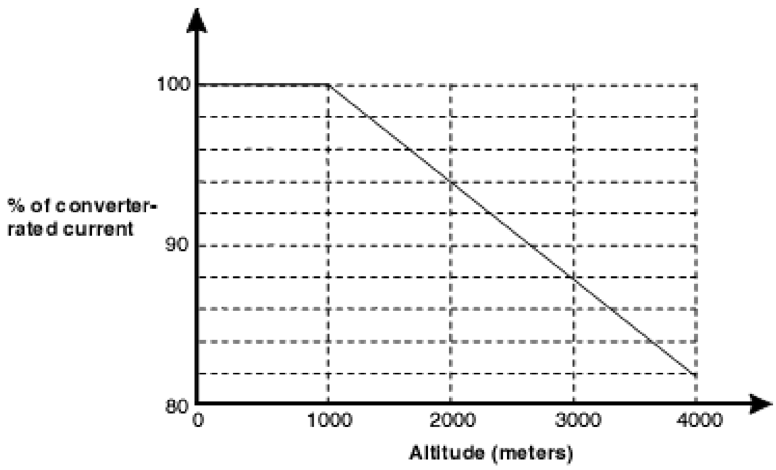



Gambar 8-1. *Grafik batasan temperatur untuk konverter PWM*.

Pabrikan AC konverter biasanya memberikan tabel batas ketinggian temperatur pada lingkungan tertentu pada temperatur 40$^0$C. grafik representatip pada gambar 8-1 untuk konverter PWM moderen.

**Batasan untuk ketinggian**

Ketinggian, akan menurunkan pendinginan pada peralatan listrik, dengan mengurangi kemampuan atmosfir, untuk memindahkan panas dari motor atau menggunakan pendingin (*heat sink*) pada konverter. Alasan ini penyebabnya tekanan udara turun dengan menaikan ketinggian, kerapatan udara turun, dan sebagai akibat kapasitas panas menurun. Berdasarkan standar, konverter AC dibatasi untuk ketinggian 1000 m diatas permukaan laut. Pabrikan AC konverter biasanya memberikan tabel batas ketinggian lebih tinggi dari 1000 m. Tabel representatip diberikan pada gambar 8-2, untuk AC konverter moderen jenis *IGBT*.




Gambar 8-2. *Grafik untuk batasan ketinggian untuk konverter jenis IGBT.*

**Pemasangan rangka konverter AV**

Konvereter AC biasanya dirancang untuk pemasangan posisi vertikal, untuk membantu pendinginan konvensional. Pada VSD ukuran besar untuk membantu pendinginannya dipasang kipas dibawah atau diatas pendingin (*heat sink*).

Kebanyakan konverter moderen memperkenankan dua alternatif pemasangan sebagai berikut :

- Pemasangan permukaan : latar belakang konverter dipasang pada permukaan pertikal, sebagai rangka belakang.

- Pemasangan inset : pendingin yang berada dibagian belakang konverter, dipadang melalui bagian belakang konverter, kedalam saluran pendingin dan pendinginan ini menjadi efektif.

**Rekomendasi keamanan secara umum**

Pabrikan memberikan rekomendasi untuk penginstalasian harus diikuti dan diimplementasikan dengan hati-hati. Tegangan yang ditampilkan pada kabel penyuplai daya, kabel motor dan yang lainnya, terminal daya harus mampu melindungi penyebab terjadinya kejutan listrik.

Khususnya, persyaratan keamanan setempat, biasanya dinyatakan pada aturan pengawatan dan kode yang lainnya pada prakteknya, harus selalu menentukan proitas yang direkomendasikan oleh pabrikan. Yang direkomendasikan pada keamanan hubungan pembumian, harus selalu hati-hati penginstalannya, sebelum sumber daya dihubungkan pada peralatan VSD. AC VSD mempunyai kapasitor yang ukurannya besar dihubungkan dengan jaringan DC.

**Area yang berbahaya**

Pada umumnya, konverter elektronika daya tidak boleh dipasang pada area yang berbahaya, bila dihubungkan pada motor dengan batasan tertentu. Bila diperlukan, konverter dapat dipasang dalam suatu rangka dan harus memperoleh setifikasi untuk keseluruhan sistem VSD, keduanya termasuk konverter dan motor.

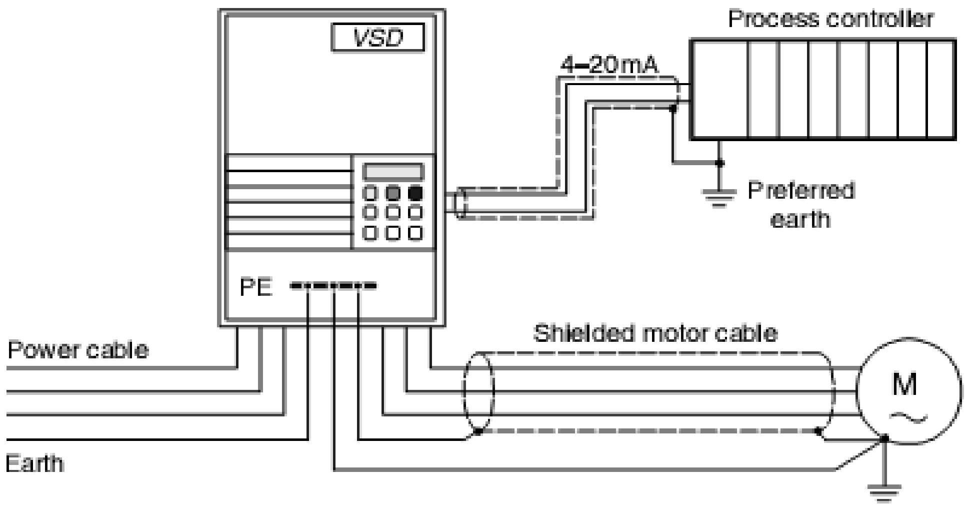
# BAB IX

## HUBUNGAN SUMBER DAYA DAN PERSYARATAN PEMBUMIAN

***Indikator Keberhasilan:*** *Setelah mengikuti pembelajaran ini siswa diharapkan dapat memahami hubungan sumber daya dan persyaratan pembumian dengan benar sesuai spesifikasi.*

### 9.1 Persyaratan hubungan kabel

Sesuai dengan prakteknya, daya yang disediakan secara normar terhadap VFD dari CB atau MCC. Kelayakan susunannya harus dibuat untuk menjamin keamanan isolasi pensaklaran dan proteksi hubung singkat pada titik hubungan sumber daya. Proteksi hubung singkat yang dipersyaratkan untuk memproteksi kabel daya terhadap konverter AC dan input penyearah jembatan pada konverter. Konverter menyediakan proteksi aliran jatuh (*down-stream*) untuk kabel motor dan motornya sendiri.




Gambar 9-1. *Hubungan pembumian, motor dan sumber daya.*

Kelayakan keamanan pembumian harus disediakan sesuai dengan peraturan pengawatan dan kode lokal pada prakteknya. Rangka logam konverter AC dan motor harus dibumikan seperti yang ditunjukan pada gambar 9-1, menjaga sentuhan potensial dengan batas aman. Chasis

konverter AC adalah peralatan sebagai terminal proteksi pembumian (PE), yang harus dihubungkan dengan keamanan pembumian.

### 9.2 Kabel sumber daya

VFD harus dihubungkan ke sumber daya dengan arti bahwa kabel layak untuk batasan arus tertentu VFD.

Konverter AC memerlukan kabel sumber tiga phasa (merah/kuning/hitam) dan penghantar PE (hijau/kuning), yang berarti kabel inti empat dengan penghantar tembaga atau alumunium. Penghantar netral tidak diperlukan dan biasanya tidak dihubungkan pada konverter. Konverter AC adalah sumber harmonik arus yang akan mengalir kembali ke impedansi rendah sistem sumber daya. Harmonik arus ini mengalir kedalam peralatan listrik yang lainnya, yang akan menyebabkan bertambahnya kerugian panas dan gangguan.

Peralatan elektronik yang sensitif, seperti alat ukur aliran kemagnitan, thermocouple, dan peralatang yang berbasis mikrokontroler, idealnya harus tidak dihubungkan pada sumber yang sama, dihilangkan melalui filter sumber daya. Tambahannya, gangguan dapat terpancar dari kabel sumber daya dan gandengan pada rangkaian yang lainnya. Kabel tersebut oleh karena itu harus dipasang jauh dari rangkaian kontrol yang sensitif. Kabel sumber daya harus dipasang pada saluran logam atau kabelnya dibalut dengan bahan tertentu untuk menghindari pncaran kekuatan elektro magnetik (emf) terhadap arus harmonik.

### 9.3 Kabel antara konverter dan motor

Kabel dari konverter AC ke motor yang menghubungkan tegangan pada PWM, dengan modulasi frekuensi tinggi. Yang menghasilkan tinggkatan harmonik yang tinggi dari pada kabel sumber daya. Frekuensi harmonik merupakan frekuensi spektrum 100 kHz – 1 MHz. Kabel motor harus lebih baik ada penyekatnya atau ditempatkan dalam saluran logam. Kabel kontrol dan komunikasi harus tidak ditempatkan pada tempat yang tertutup. Tingkatan pancaran emf untuk kabel tinggi, dengan tiga pemisah

pada satu inti, diletakan secara horizontal pada kabel utama, daripada penghalang kabel dengan pelindung konsentis.

Ukuran yang direkomendasi untuk kabel antara konverter AC dan motor harus lebih baik sama halnya seperti kabel sumber daya. Alasannya adalah :

- Akan menjadi mudah untuk menambahkan peralatan paralel langsung dengan frekuensi konverter.
- Kapasitas pembebanan dari kabel motor juga mengurangi arus harmonik dan dengan tambahan kapasitor arus bocor.

Ini harus meyakinkan bahwa konverter AC VSD dilengkapi dengan proteksi hubung singkat dan beban lebih, untuk kabel dan motor. Kabel pembumian terpisah antara konverter dan motor direkomendasi untuk keduanya keamanan dan peredam kebisingan. Penghantar pembumian dari motor harus dihubungkan kembali pada terminal PE konverter dan tidak kembali ke DB. Ini akan menghindari sesuatu sirkulasi arus frekuensi tinggi pada sistem pembumian.

### 9.4 Kabel kontrol

Kabel kontrol harus sesuai dengan ketentuan lokal yang normal. Kabel kontrol tersebut harus memiliki luas penampang lebih dari 0,5 $mm^2$ untuk alasan terjadinya tegangan jatuh. Kabel kontrol dan komunikasi, dihubungkan ke konverter harus ada perlindungnya sebagai proteksi. Pelindungnya harus dibumikan pada salah satu ujungnya, pada titik terpisah dari konverter. Perlidungan pembumian terhadap terminal PE pengendali harus dihindari sebab konverter adalah sumber interfensi besar. Perlindungan harus layak dibumikan pada ujung peralatan.

Perlindungan kabel merupakan proteksi yang baik dari interfensi gandengan. Kabel kontrol harus layak diinstal secara terpisah dengan penyangga kabel atau saluran kabel dan jauh dari kabel daya jika memungkinkan. Jika kabel kontrol diinstal pada penyangga kabel yang sama dengan kabel daya, pemisahan harus dilakukan sejauh mungkin,

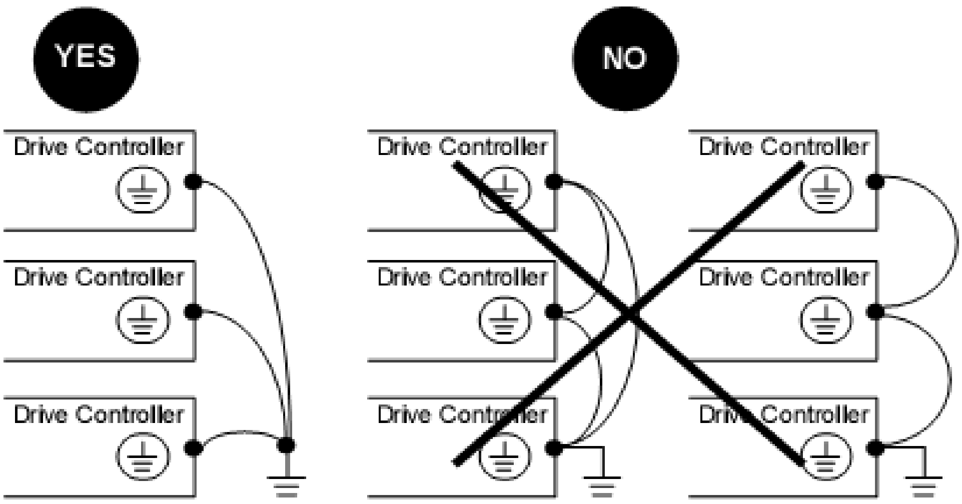
dengan jarak minimum kira-kira 300 mm. Pemasangan secara paralel dengan jarak yang sama pada pengangga kabel harus dihindari.

## 9.5 Persyaratan pembumian

Telah diutarakan sebelumnya, keduanya konverter AC dan motor harus memberikan keamanan pembumian menurut persyaratan standar setempat. Tujuan utama dari pembumian ini adalah untuk menghindari tegangan yang berbahaya, pada bagian logam yang terbuka, saat terjadi kondisi kesalahan.

Bila perancangan dan penginstalasian hubungan pembumian tersebut, memenuhi persyaratan untuk memperkecil induksi elektromagnetik harus direalisasikan, dengan cara yang sama menghubungkan pembumian. Hubungan pembumian utama pada konverter AC biasanya disusun seperti yang ditunjukan pada gambar 9-2.

Terminal PE pada konverter harus dihubungkan kembali pada sistem pembumian, biasanya ditempatkan pada DB. Hubungan ini harus memiliki impedansi yang rendah untuk dikembalikan ke bumi.




Gambar 9-2. Pembumian VFD.

## 9.6 Kesalahan dasar pada kabel

Berdasarkan beberapa kesalahan dasar pada kabel yang terjadi bila mengintal VFD :

- Penghantar pembumian dari konverter AC dipasang pada saluran atau penyangga kabel yang sama dengan kabel yang lainnya, seperti kabel kontrol dan daya untuk peralatan yang lainnya. Arus harmonik dapat bergandengan pada rangkaian yang sensitif. Idealnya kabel instrumen harus dipasang terpisah pada saluran logam atau pipa baja.
- Pemasangan kabel motor tanpa perlindungan, selanjutnya kabel sumber, kabel konverter AC atau daya untuk peralatan yang lainnya. Arus harmonik frekuensi tinggi dapat bergandengan pada kabel daya, yang dapat menghantarkan pada peralatan elektronik yang sensitif. Kabel yang lainnya harus dipisahkan dari kabel motor atau kabel daya konverter dengan jarak minimum 300 mm.
- Kabel antara konverter AC dengan motor tidak boleh terlalu panjang melebihi 100m. Kasusnya jika kabel yang digunakan terlalu panjang, motor membutuhkan filter untuk mengurangi arus bocor. Alternatif lain, dapat mengurangi pensaklaran frekuensi.

# BAB X

## PENCEGAHAN UNTUK KONTROL START/STOP PENGENDALI AC

***Indikator Keberhasilan:*** *Setelah mengikuti pembelajaran ini siswa diharapkan dapat memahami pencegahan untuk kontrol start/stop pengendali AC dengan benar.*

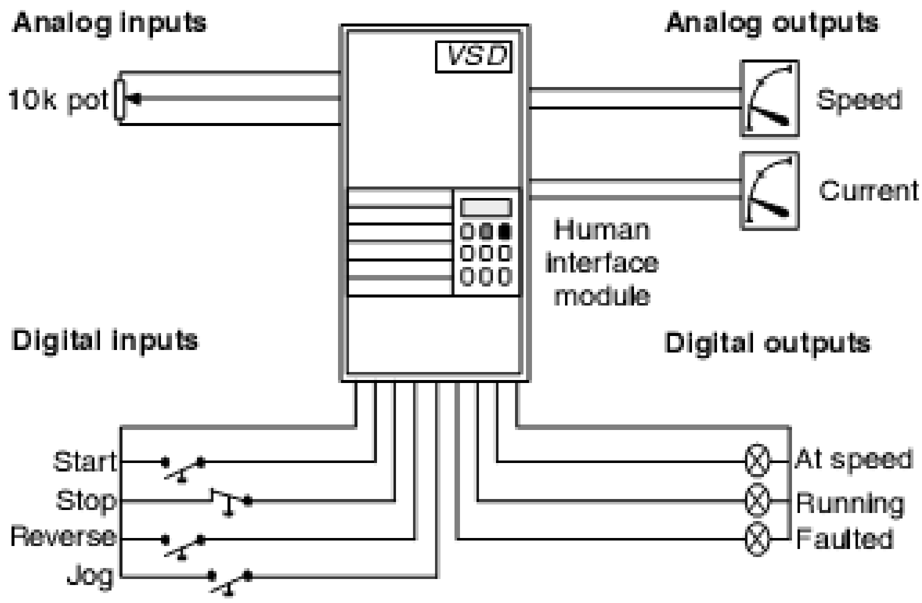
Proteksi disisi sumber utama konverter diperlukan sebagai proteksi hubung-singkat. Ini dapat dilakukan memasang sikring dengan batasan yang layak, biasanya merupakan bagian dari satuan pensaklaran-sikring atau *circuit-breaker* utama. Kontrol *start/stop* pada pengendali AC dapat direalisasikan dalam beberapa cara, yang utama :

- Pengontrolan input *start/stop* pada rangkaian kontrol konverter
- Pemutusan rangkaian daya dengan kontaktor

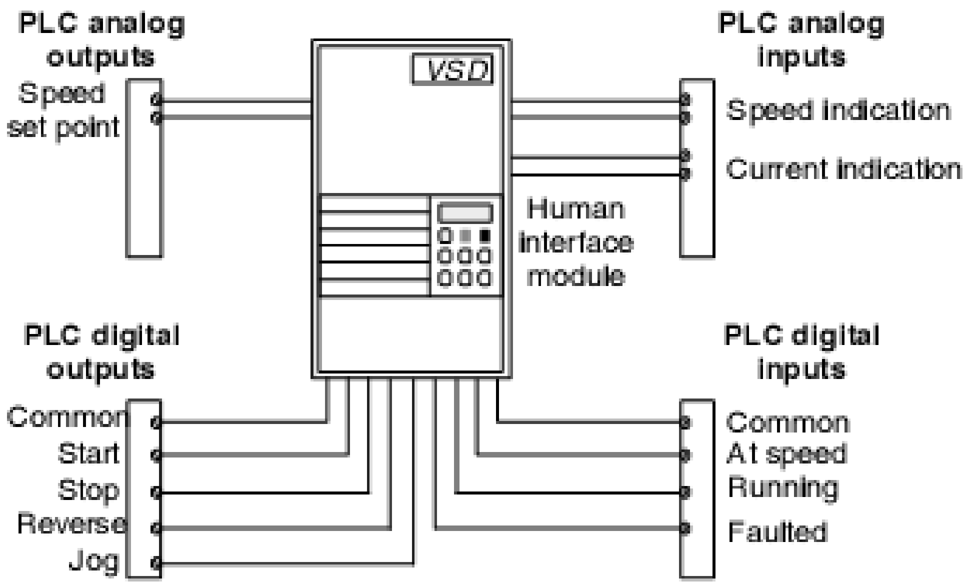
Pertama metoda yang direkomendasi pada pengontrolan *start/stop* konverter AC. Ini dapat direalisasikan dengan tombol tekan start dan stop dilakukan dengan penggawatan langsung pada terminal kontrol konverter, seperti yang ditunjukan pada gambar 10-1. Alternatif lain jika pengontrolan dari peralatan yang terpisah seperti PLC, ini dapat dilakukan penggawatan secara langsung dari PLC ke terminal konverter AC, seperti yang ditunjukan pada gambar 10-2. Metoda kedua adalah salah satunya yang digunakan secara mendasar, untuk starter DOL kecepatan tetap motor AC. Berdasarkan praktek yang standar sebelumnya DOL, metoda ini juga sangat mendasar digunakan di Industri untuk pengontrolan VFD, terutama untuk konveyor.

Disini biasanya diperlukan keamanan, dilengkapi dengan *emergency stop* atau saklar tarik yang menggunakan kawat untuk memutuskan rangkaian daya yang sedang dioperasikan. Ada kalanya metoda ini memuaskan terhadap keamanan yang diperlukan dengan memutuskan sumber daya

ke motor, ini merupakan beberapa potensi yang berbahaya dengan metoda pengontrolan seperti ini.




Gambar 10-1. Konfigurasi jenis pengawatan sistem kontrol manual.




Gambar 10-2. Konfigurasi jenis pengawatan sistem kontrol otomatis.

**Masalah utama adalah :**

**1. Kontaktor pada sisi sumber konverter AC**

Menghubungkan/memutuskan sisi sumber konverter AC untuk kontrol stop/start harus direalisasikan, sebab pada kebanyakan konverter moderen mengambil daya dari sumber tegangan bolak-balik. Setiap saat daya dialihkan, berikut ini alokasi kesalahan :

- Daya ke rangkaian kontrol hilang
- Tampilan kontrol tidak nampak
- Informasi diagnostik menghilang
- Kapasitor DC terjadi pengosongan
- Serial komunikasi hilang

Bila AC VFD dijalankan kembali, ada penundaan waktu (biasanya 2 s), dimana sistem pengisian DC telah terpenuhi urutannya untuk mengisi kembali kapasitor DC. Dititik beratkan pada resistor pengisi, kapasitor DC, dan komponen yang lainnya. Resistor pengisi pada kebanyakan konverter AC merupakan batasan waktu yang diperpendek. Walaupun ditonjolkan pada buku manual, beberapa batasan start dapat dilakukan. Kebanyakan pengguna konsep _bekerja jika daya dinyalakan' bahwa dapat diterima dan tanpa batas. Berikut ini kutipan dari manual salah satu pabrikan konverter AC yang subah maju :

**ATTENTION:**

*The drive is intended to be controlled by, control input signals that will start and stop the motor. A device that routinely disconnects and then reapplies line power to the drive, for the purpose of starting and stopping the motor, is not recommended.*

*If this type of circuit is used, a maximum of 3 stop/start cycles, in any 5-min period (with a minimum period of 1-min rest between each cycle) is required. These 5-min periods must be separated, by 10-min rest cycles, to allow the drive precharge resistors to cool. Refer to codes and standards applicable, to your particular system, for specific requirements and additional information.*

## 2. Kontaktor pada sisi motor konverter AC

Menghubungkan/memutuskan rangkaian daya tiga phasa, pada sisi motor konverter AC untuk kontrol start/stop harus dihindari dimana pengendali AC sedang bekerja. Pemutusan rangkaian induktif dari motor akan menghasilkan transien tegangan lebih, yang akan merusak IGBT dan komponen yang lainnya. Kebanyakan konverter AC mempunyai rangkaian suspensi RC untuk memproteksi IGBT dari jenis pensaklaran seperti ini. Berikut ini kutipan dari manual salah satu pabrikan konverter AC yang sudah maju :

**ATTENTION:**

*Any disconnecting method, wired to the drive output terminals U, V and W must be capable of disabling the drive, if operated during the drive operation.*

*If opened, during the operation, the drive will continue to produce an output voltage between U, V and W. An auxiliary contact must be used, to simultaneously disable the drive, or else output component damage may occur. The objective is to ensure, that the AC Converter is OFF before the contacts between the converter and the motor are opened. This will avoid IGBT damage due to transient over-voltages. In addition, closing the motor side contactor, when converter output voltage is present, can result in a motor inrush current, similar to DOL starting. Apart from the stress this places on the converter, the drive will trip on over-current. Repeated attempts at closing the motor contactor after the converter has started, may eventually lead to IGBT failure.*

*If a contactor has to be installed into the power circuit of an AC Variable Speed Drive system, to meet local safety requirements, then it is better to locate this contactor downstream of the AC converter. It is then necessary to include, an auxiliary contact on the contactor, which disables the converter control circuit, BEFORE the contactor is opened or closes the enable circuit, AFTER the contactor has been closed. This means that a Late Make-Early Break auxiliary contact, should be used on the contactor and wired to the converter Enable input.*

*While the above configuration will protect the AC converter from failure, this method of routine stop/start control is NOT recommended. It should be used for "Emergency Stop" conditions only. Routine stop/start sequences should be done from the AC converter control terminals. An alternative method of ensuring that plant operators follow this requirement is, to install a latching relay and a Reset pushbutton. The latching relay needs to be reset after every 'Emergency Stop' sequence.*

# BAB XI

## PENGAWATAN KONTROL UNTUK VFD

***Indikator Keberhasilan:*** *Setelah mengikuti pembelajaran ini siswa diharapkan dapat memahami pengawatan kontrol untuk VSD dengan benar.*

VFD dapat dikontrol secara lokal yang berarti memasang tombol tekan maual, saklar dan potensiometer dibagian depan konverter. Contoh, pengoperasian pengontrolan secara manual, pengontrolan lokal ini diperlukan untuk mengoperasikan VFD.

Pada kebanyakan industri aplikasi, ini tidak dipraktekkan untuk mengontrol VFD dari posisi dimana VFD ditempatkan. VFD biasanya dipasang didalam MCC yang lokasinya di Ruangan Kontrol biasanya bersatu dengan komponen kontrol yang lainnya.

### 11.1 pengoperasian terpisah (*remote*) VFD

VFD menyediakan terminal ‗*Remote Control*' untuk dioperasikan dari lokasi tertentu. VFD menyediakan terminal untuk pengontrolan sebagai berikut :

- *DI,* sebagai *remote Start, Stop, Reverse, Jog*, dst biasanya diimlementasikan dengan :
    a) Tombol tekan terpisah (*remote*) pada sistem pengontrolan secara manual.
    b) DO proses kontrol pada sistem otomatis.
- *Status output digital*, sebagai indikator *Running, Stopped, At Speed, Faulted*, dst biasanya diimlementasikan dengan :
    a) Alarm remote dan lampu indikator pada sistem pengontrolan secara manual.
    b) DI untuk proses kontrol pada sistem otomatis.
- *AI*, sebagai *remote Speed Reference, Torque Reference*, dst biasanya diimlementasikan dengan :

a) *Remote* potensiometer (10 kΩ) pada sistem pengontrolan secara manual.
b) Output analog, sebagai *remote Speed indication, Current Indication,* dst dst biasanya diimlementasikan dengan *remote display meter* (0-10 V) pada sistem pengontrolan secara manual.
c) *AI* proses kontrol pada sistem otomatis biasanya menggunakan 4-20mA sinyal pembawa pada kabel yang diberi perisai.

Sistem kontrol manual dan otomatis dapat dioperasikan sangat efektif untuk beberapa tahun dibandingkan dengan jenis sistem kontrol dengan kawat. Keuntungan utama pada sistem ini adalah :

- Semua DI dan DO memerlukan satu kawat tiap fungsi dan dihubungkan bersama.
- Semua AI dan AO memerlukan dua kawat tiap fungsi dan dihubungkan dengan perisai.

### 11.2 Hubungan pengawatan sistem kontrol PLC

Dengan pengenalan sisten kontrol otomatis, PLC dan sistim kontrol distribusi (DCS), hubungan kontrol pengawatan telah dikembangkan, dengan modul *input/output* (I/O) mengeliminasi kontrol manual.

Kompleksitas sistim kontrol telah berkembang dan sejumlah informasi diperlukan dari  sensor sehingga menambah jumlah penghantar yang diperlukan untuk diimplementasikan pada sistim kontrol otomatis. Ini berpengaruh pada pembiayaan dan kompleksitas.

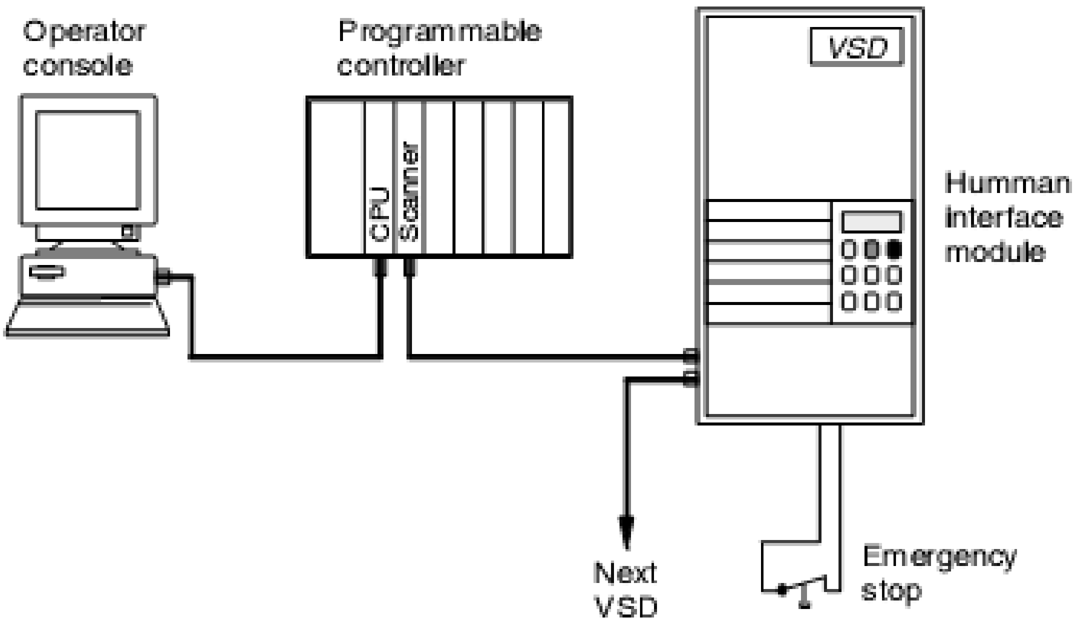
Beberapa peralatan menjadi terintegrasi kepada sistim kontrol seluruhnya, hal tersebut menimbulkan masalah pada kabel yang komplek.
Pengawatan antar-muka antara VFD dan PLC biasanya membutuhkan kira-kira 15 penghantar sebagai berikut :

- Lima penghantar untuk pengontrolan seperti *Start, Stop, Enable, Reverse* dst.
- Empat penghantar untuk status/alarm, seperti *Running, Faulted, at Speed*, dst
- Dua atau tiga penghantar untuk kontrol analog, seperti *Speed set point*.
- Empat penghantar untuk status analog, seperti *Speed indication, Current indication*.

Jika terdapat beberapa VFD dalam suatu sistem, jumlah kawat dikalikan dengan jumlah VFD dalam sistim tersebut.

### 11.3 Serial komunikasi dengan sistim kontrol PLC

Serial komunikasi membantu masalah yang timbul dalam pengkabelan dan instrumen yang komplek dan sistim VFD menjadi terkoneksi bersama, dalam sistim kontrol otomatis dengan kabel minimum.




Gambar 11-1. Konfigurasi jenis sistim komunikasi serial.

Peralatan kontrol digital berbasis-mikroprosessor, kadang-kadang disebut peralatan ‗Smart' semakin banyak digunakan pabrik otomatis moderen dan sistim kontrol proses industri. Informasi kontrol dan status dapat

dipindahkan secara serial antara kontrol proses dan VFD yang ditempatkan dilapangan. Pengesetan parameter dapat diatur secara terpisah dari titik sentral (gambar 11-1).

# BAB XII

## KOMISIONING VFD

***Indikator Keberhasilan:*** *Setelah mengikuti pembelajaran ini siswa diharapkan dapat melakukan komisioning untuk VFD dengan benar.*

### 12.1 Tujuan komisioning

Tujuan utama komisioning VFD adalah untuk menyakikan bahwa :

- Apakah konverter AC dan motor, telah dipasang dengan benar dan memenuhi syarat pengawatan dan standar pengawatan.
- Apakah kabel daya dan motor, sudah benar ukurannya, penginstalannya dan terminasinya.
- Apakah semua pelindung kabel daya, sudah benar dibumikan pada kedua ujungnya terhadap terminal PE pada konverter, pada motor, pada CB atau MCC.
- Apakah kabel kontrol, sudah benar diinstal sesuai dengan perancangan sistim kontrol.
- Apakah semua perlindungan kabel kontrol, sudah benar dibumikan hanya pada ujungnya, layak pada sistim kontrol prosese.
- Tidak ada kesalahan murni pada kabel pada saat pertama kali diaktifkan.

### 12.2 Aplikasi yang benar pada pengesetan dan pemilihan

Ada kalanya semua dasar pengujian telah dilengkapi, bersama dengan lembar pengujian komisioning, VFD siap untuk diaktifkan.

Ini direkomendasi bahwa jika konverter diaktifkan untuk pertama kali, kabel motor harus tidak dihubungkan selama parameter dasar diset setelah selesai diinstal pada konverter. Ini akan menghindari masalah seperti mula jalan motor salah putaran, mula jalan dengan waktu akselerasi yang tinggi dan seterusnya. Ini tidak membahayakan konverter PWM karena pada sisi output dilengkapi dengan rangkaian terbuka. Ada

kalanya inisial pengesetan dan pengujian tanpa beban telah dilengkapi, kabel motor isolasinya telah diuji dan dihubungkan untuk pengujian akhir komisioning tanpa beban.

### 12.3 Parameter yang benar pada pengesetan dan pemilihan

VFD akan bekerja dengan benar, jika parameter dasar telah diset dengan benar, dapat disesuaikan dengan aplikasinya. Berdasarkan parameter dasar harus diperiksa kembali, sebelum VFD dihubungkan pada beban mekanik :

- Tegangan harus dipilih dengan benar untuk sumber tegangan dan disesuiakan dengan motor listrik yang dihubungkan ke output. Di Indonesia, standar tegangan 380 Volt, sistim tiga phasa. Ini harus diyakinkan bahwa tegangan output Volt/Hz sudah benar sesuia dengan yang tertera pada pelat nama motor.
- Frekuensi harus dipilih dengan benar untuk sumber tegangan dan disesuiakan dengan motor listrik yang dihubungkan ke output. Di Indonesia, standar frekuensi 50 Hz. Ini harus diyakinkan bahwa frekuensi output Volt/Hz sudah benar sesuia dengan yang tertera pada pelat nama motor.
- Hubungan ke kipas pendingin harus diperiksa untuk meyakinkan bahwa sambungan transformator sudah dipilih dengan benar.

Setelah itu, set kembali parameter yang dapat dipilih sebagai berikut :

- *Kecepatan maksimum* : biasanya diset 50 Hz, tetapi sering kali diset pada kecepatan tinggi disesuaikan dengan aplikasinya.
- *Kecepatan minimum* : biasanya 0 Hz untuk pengendali pompa dan kipas, tetapi sering kali diset pada kecepatan tinggi disesuaikan dengan aplikasi torsi tetap.
- *Nilai arus motor* : ini tergantung kepada ukuran motor terhadap kemampuan arus konverter. Nilai arus konverter harus selalu sama atau lebih tinggi dari nilai arus motor. Untuk memenuhi syarat proteksi motor, nilai arus yang benar harus dipilih.

- *Batas arus* : ditentukan oleh torsi awal motor. Jika torsi awalnya tinggi, diset diatas 150% akan memberikan torsi awal yang tinggi.
- *Akselerasi Waktu* : ditentukan oleh kenaikan waktu dari kecepatan nol sampai maksimum. Ini harus dipilih berdasarkan hubungan beban inersia mekanik dan jenis aplikasinya. Contoh : aplikasi pompa, akselerasi waktu harus cukup perlahan-lahan untuk mencegah tekanan air pada pipa.
- *Dekelerasi waktu* :ditentukan oleh penurunan waktu dari kecepatan maksimum sampai nol. Pengesetan ini hanya bisa diaplikasikan jika opsi stop dipilih. Alternatif lain biasanya dengan pengereman DC. Pada beban dengan momen inertia tinggi tidak boleh diset terlalu singkat. Jika dekelerasi waktu dibawah penurunan waktu yang alami pada suatu beban, tegangan DC akan naik dan mengakibatkan proteksi tegangan lebih bekerja. Dekelerasi waktu hanya singkat dari pada penurunan waktu alami jika resistor pengereman dinamik telah dipasang.
- *Kenaikan torsi awal :* dapat dipilih jika beban menunjukan pengereman torsi. Fitur ini harus digunakan secara hati-hati untuk mencegah kelebihan kemagnitan motor pada kecepatan rendah. Pengesetan yang terlalu tinggi akan mengakibatkan motor panas yang berlebihan. Hanya kenaikan torsi yang cukup harus dipilih, untuk meyakinkan bahwa VFD melampaui pengereman torsi pada beban awal.

Banyak pengesetan yang mendasar pada VFD digital moderen. Uraian diatas sangat penting dan harus diperiksa sebelum mulai dijalankan. Parameter tetap biasanya bisa terjadi kegagalan pengesetan yang akan memungkinkan terjadi pada kebanyakan aplikasi tertentu.

Bagaimanapun, hal ini harus diperiksa dan diatur agar pengoperasian menjadi optimal.

# BAB XIII

## PENGESETAN INVERTER (VFD)

***Indikator Keberhasilan:*** *Setelah mengikuti pembelajaran ini siswa diharapkan dapat memahami hal-hal yang perlu diperhatikan sebelum mengoperasikan VFD dengan benar.*

### 13.1 Hal yang penting perlu diperhatikan.

<table>
<tr><td>Unpacking and inspection</td><td>

• Inspect the inverter for any damage that may have occurred during shipping. To verify the inverter unit is the correct one for the application you need, check the inverter type, output ratings on the nameplate and the inverter is intact.



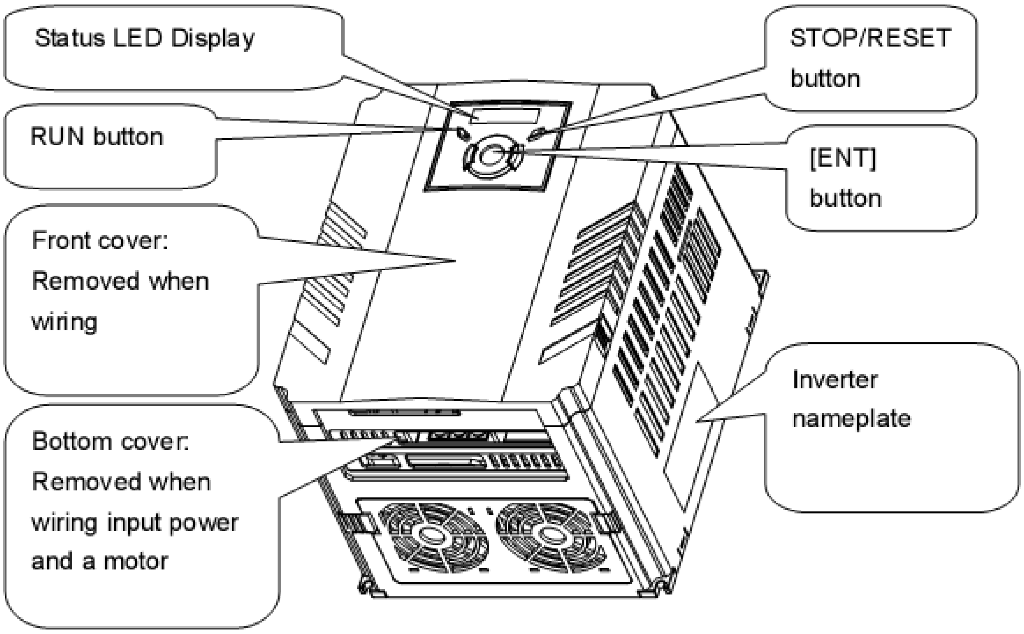

<table>
<tr><td colspan="3">SV</td><td>075</td><td>iG5A</td><td>-</td><td colspan="2">2</td><td colspan="2">NC</td></tr>
<tr><td rowspan="9">LG Inverter</td><td colspan="2">Motor rating</td><td></td><td>Series Name</td><td></td><td colspan="2">Input power</td><td colspan="2">Frame name</td></tr>
<tr><td>004</td><td>0.4 [kW]</td><td></td><td rowspan="8">iG5A</td><td rowspan="8"></td><td rowspan="4">2</td><td rowspan="4">Three Phase 200~230[V]</td><td rowspan="4">-</td><td rowspan="4">Forced cooling</td></tr>
<tr><td>008</td><td>0.75 [kW]</td><td></td></tr>
<tr><td>015</td><td>1.5 [kW]</td><td></td></tr>
<tr><td>022</td><td>2.2 [kW]</td><td></td></tr>
<tr><td>037</td><td>3.7 [kW]</td><td></td><td rowspan="4">4</td><td rowspan="4">Three Phase 380~480[V]</td><td rowspan="4">NC</td><td rowspan="4">1 Hp Natural convection</td></tr>
<tr><td>040</td><td>4.0 [kW]</td><td></td></tr>
<tr><td>055</td><td>5.5 [kW]</td><td></td></tr>
<tr><td>075</td><td>7.5 [kW]</td><td></td></tr>
</table>

• Accessories

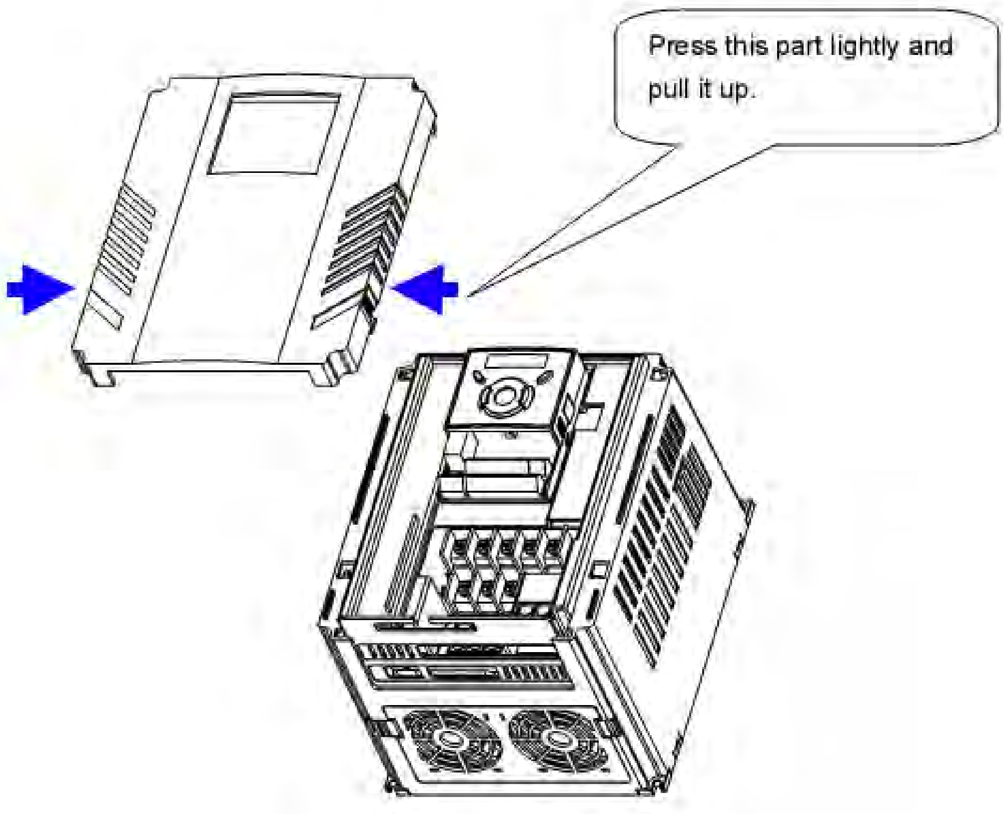
If you have found any discrepancy, damage, etc., contact your sales representative.
</td></tr>
<tr><td>Preparations of instruments and parts required for operation</td><td>Instruments and parts to be prepared depend on how the inverter is operated. Prepare equipment and parts as necessary.</td></tr>
<tr><td>Installation</td><td>To operate the inverter with high performance for a long time, install the inverter in a proper place in the correct direction and with proper clearances</td></tr>
<tr><td>Wiring</td><td>Connect the power supply, motor and operation signals (control signals) to the terminal block. Note that incorrect connection may damage the inverter and peripheral devices</td></tr>
</table>

## 13.2 Tampilan secara detail

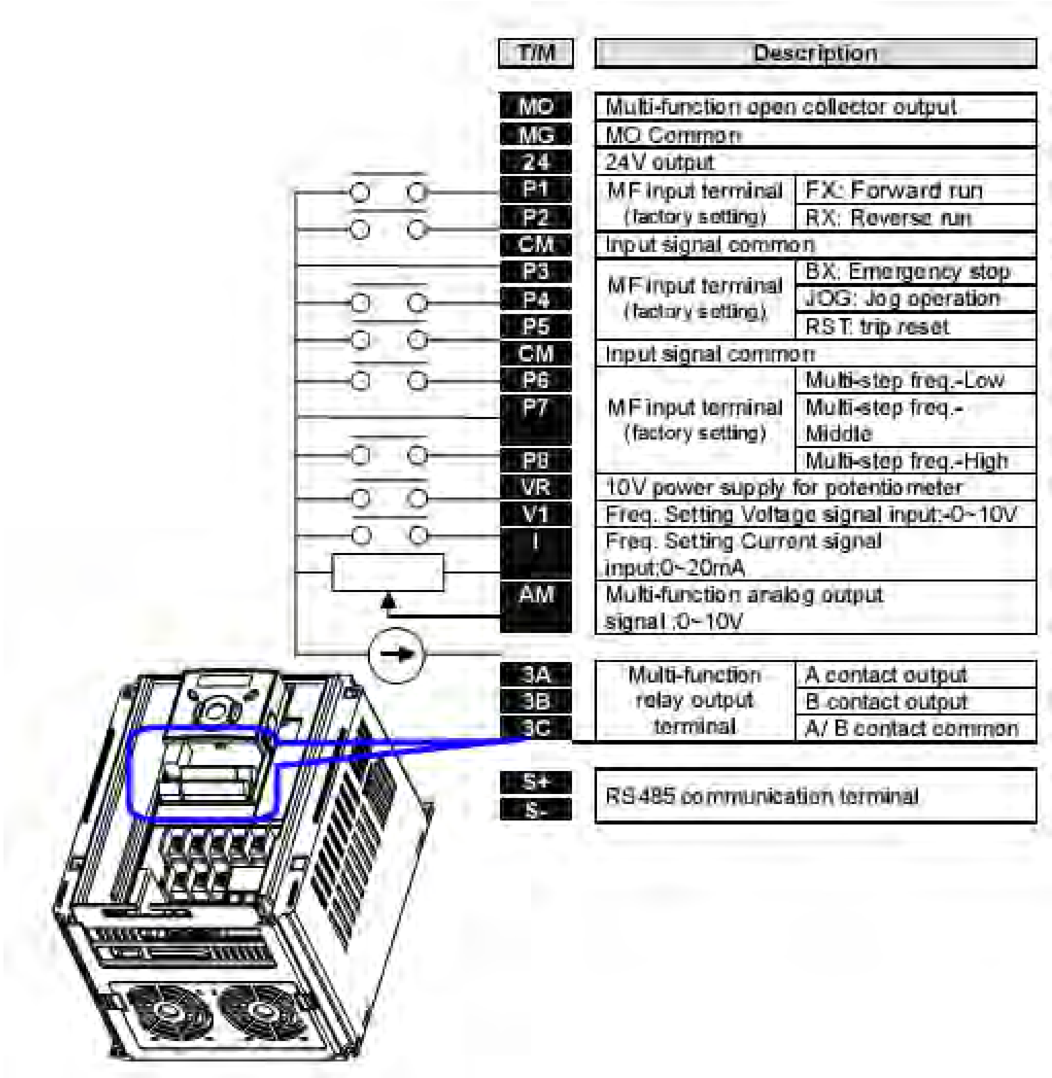
- **Tampak luar**



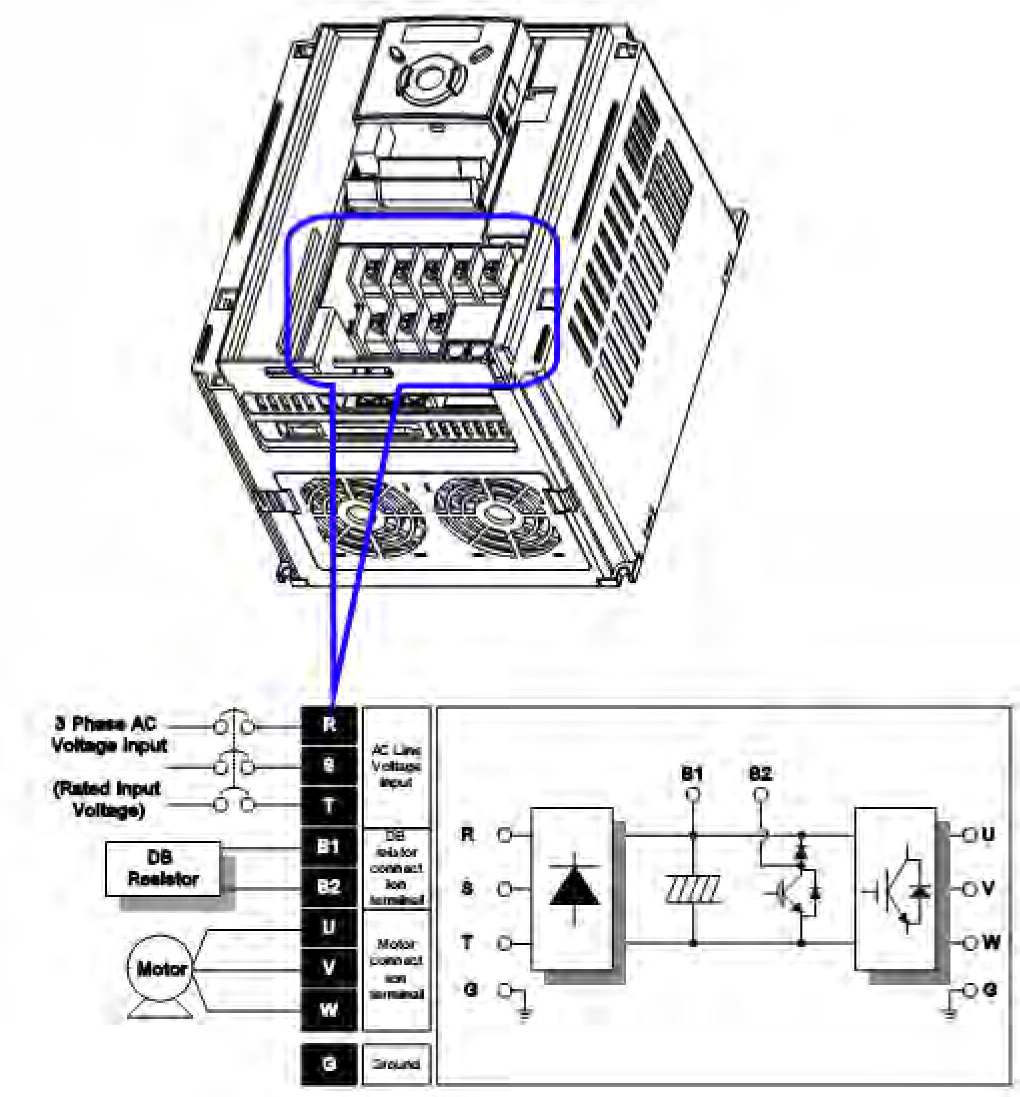

- **Membuka dan menutup kover depan**



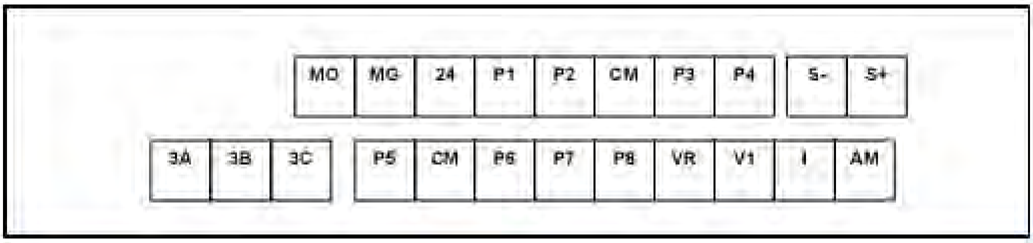
## 13.2 Terminal pengawatan



- **Terminal daya**

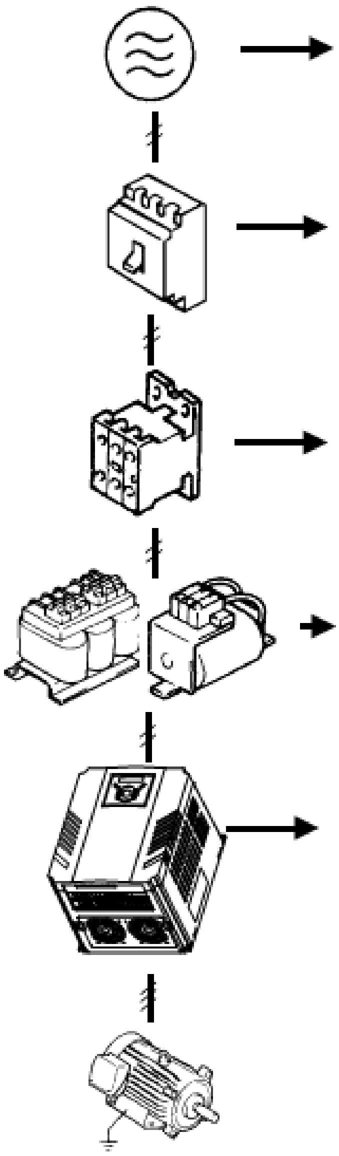


- **Spesifikasi terminal kontrol.**



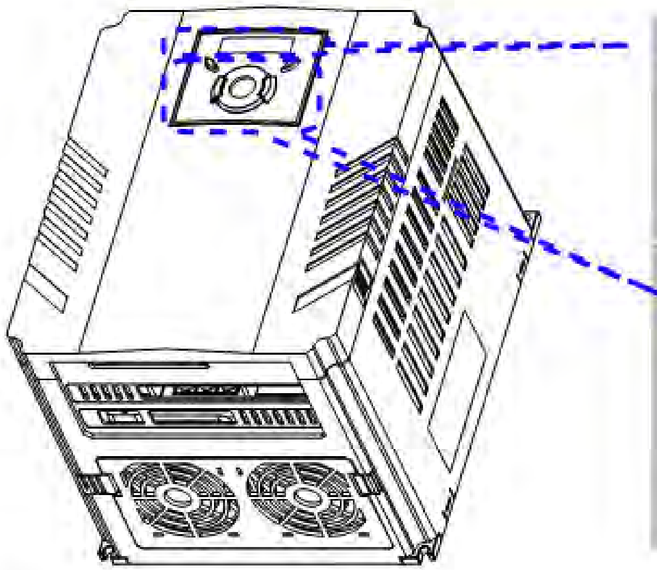

| T/M | Terminal Description | Wire size[mm²] single wire | Wire size[mm²] Stranded | Screw size | Torque [Nm] | Specification |
|---|---|---|---|---|---|---|
| P1~P8 | Multi-function input T/M 1-8 | 1.0 | 1.5 | M2.6 | 0.4 | |
| CM | Common Terminal | 1.0 | 1.5 | M2.6 | 0.4 | |
| VR | Power supply for external potentiometer | 1.0 | 1.5 | M2.6 | 0.4 | Output voltage: 12V Max output current: 100mA Potentiometer:1 ~ 5kohm |
| V1 | Input terminal for Voltage operation | 1.0 | 1.5 | M2.6 | 0.4 | Max input voltage: -12V ~ +12V input |
| I | Input terminal for Current operation | 1.0 | 1.5 | M2.6 | 0.4 | 0 ~ 20mA input Internal resistor: 500 ohm |
| AM | Multi-function analog output terminal | 1.0 | 1.5 | M2.6 | 0.4 | Max output voltage: 1[V] Max output current: 100mA |
| MO | Multi-function terminal for open collector | 1.0 | 1.5 | M2.6 | 0.4 | Below DC 26V,100mA |
| MG | Ground terminal for external power supply | 1.0 | 1.5 | M2.6 | 0.4 | |
| 24 | 24V External Power Supply | 1.0 | 1.5 | M2.6 | 0.4 | Max output current: 100mA |
| 3A | Multi-function relay output A contact | 1.0 | 1.5 | M2.6 | 0.4 | Below AC 250V, 1A |
| 3B | Multi-function relay output B contact | 1.0 | 1.5 | M2.6 | 0.4 | Below DC 30V, 1A |
| 3C | Common for Multi-function relays | 1.0 | 1.5 | M2.6 | 0.4 | |

## 13.3 Konfigurasi Dasar.



| | |
|---|---|
| AC Source Supply | Use the power supply within the permissible range of inverter input power rating (Refer to Page 15-1). |
| MCCB or Earth leakage circuit breaker (ELB) | Select circuit breakers with care. A large inrush current may flow in the inverter at power on. |
| Magnetic Contactor | Install it if necessary. When installed, do not use it for the purpose of starting or stopping. Otherwise, it could lead to reduction in product life. |
| AC/DC Reactors | The reactors must be used when the power factor is to be improved or the inverter is installed near a large power supply system (1000kVA or more and wiring distance within 10m). |
| Installation and wiring | To operate the inverter with high performance for a long time, install the inverter in a proper place in the correct direction and with proper clearances. Incorrect terminal wiring could result in the equipment damage. |
| To motor | Do not connect a power factor capacitor, surge suppressor or radio noise filter to the output side of the inverter. |

## 13.4 Keypad pemrograman




| Display | | |
|---|---|---|
| FWD/REV | Lit during forward run | Blinks when a fault occurs |
| REV | Lit during reverse run | |
| RUN | Lit during Operation | |
| SET | Lit during parameter setting | |
| 7 segment | Displays operation status and parameter information | |

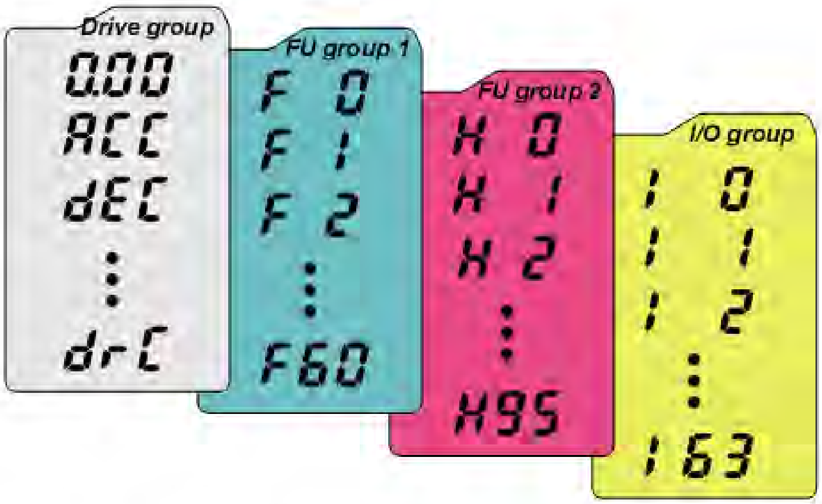
| Keys | | |
|---|---|---|
| RUN | | Run command |
| STOP/RESET | | STOP: Stop command during operation,<br>RESET: Reset command when fault occurs. |
| ▲ | UP | Used to scroll through codes or increase parameter value |
| ▼ | Down | Used to scroll through codes or decrease parameter value |
| ◄ | Left | Used to jump to other parameter groups or move a cursor to the left to change the parameter value |
| ► | Right | Used to jump to other parameter groups or move cursor to the right to change the parameter value |
| ● | ENT | Used to set the parameter value or save the changed parameter value |

- **Tampilan alpha-numeric pada LED keypad**

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | | A | | K | | U |
| | 1 | | B | | L | | V |
| | 2 | | C | | M | | W |
| | 3 | | D | | N | | X |
| | 4 | | E | | O | | Y |
| | 5 | | F | | P | | Z |
| | 6 | | G | | Q | | |
| | 7 | | H | | R | | |
| | 8 | | I | | S | | |
| | 9 | | J | | T | | |

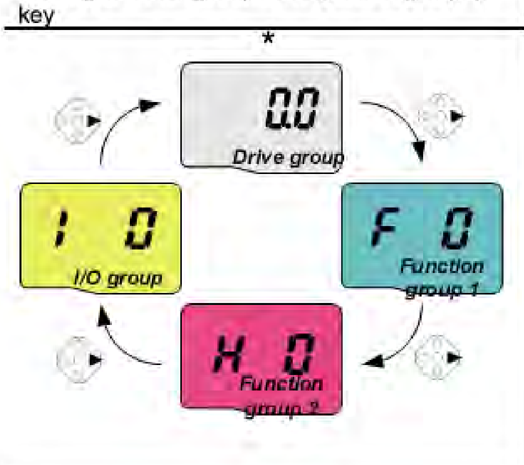
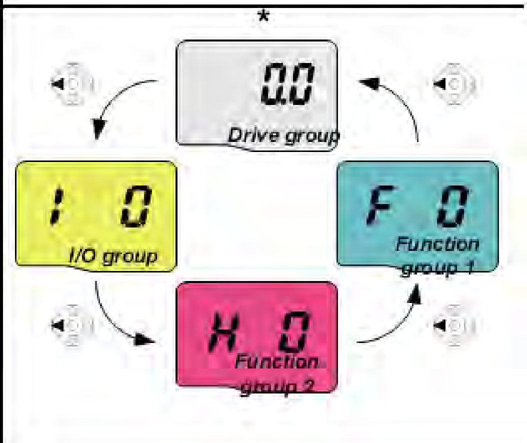
## 13.5 Menggerakkan kelompok lain.

- Ada 4 perbedaan kelompok parameter pada seri SV-iG5A seperti yang ditunjukan dibawah ini.




| | |
|---|---|
| Drive group | Basic parameters necessary for the inverter to run. Parameters such as Target frequency, Accel/Decel time settable. |
| Function group 1 | Basic function parameters to adjust output frequency and voltage. |
| Function group 2 | Advanced function parameters to set parameters for such as PID Operation and second motor operation. |
| I/O (Input/Output) group | Parameters necessary to make up a sequence using Multi-function input/output terminal. |

- **Menggeserkan ke kelompok parameter lainnya** hanya tersedia pada kode pertama masing-masing kelompok seperti yang ditunjukan dibawah ini.

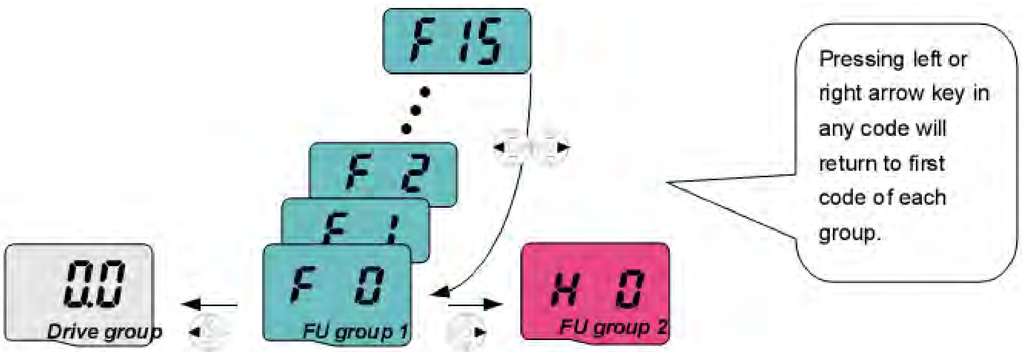
| Moving to other groups using the Right (▶) key | Moving to other groups using the Left (◀) key |
|---|---|
|  |  |

- Bagaimana menggeserkan ke kelompok yang lainnya pada kode pertama dimasing-masing kelompok.

| | | |
|---|---|---|
| 1 | 0.00 | -. **The 1st code in Drive group "0.00"** will be displayed when AC input power is applied.<br>-. Press the right arrow (▶) key once to go to Function group 1. |
| 2 | F 0 | -. **The 1st code in Function group 1 "F 0"** will be displayed.<br>-. Press the right arrow (▶) key once to go to Function group 2 |
| 3 | H 0 | -. **The 1st code in Function group 2 "H 0"** will be displayed.<br>-. Press the right arrow (▶) key once to go to I/O group. |
| 4 | I 0 | **-. The 1st code in I/O group "I 0" will be displayed.**<br>-. Press the right arrow (▶) key once again to return to Drive group. |
| 5 | 0.00 | -. Return to **the 1st code in Drive group "0.00"**. |

♣ If the left arrow key (◀) is used, the above will be executed in the reverse order.

- Bagaimana menggerakkan ke kelompok lain dari suatu kode pertama yang lainnya.

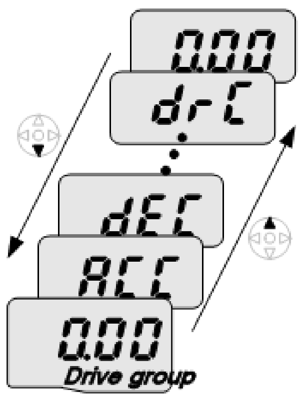



To move from the F 15 to function group 2

| | | |
|---|---|---|
| 1 | F 15 | -. In F 15, press the Left (◀) or Right arrow (▶) key. Pressing the key goes to the first code of the group. |
| 2 | F 0 | -. The 1st code in function group 1 "F 0" is displayed.<br>-. Press the right arrow (▶) key. |
| 3 | H 0 | -. The 1st code in function group 2 "H 0" will be displayed. |

## 13.6 Bagaimana merubah kode didalam kelompok.

- Merubah kode dalam kelompok kendali

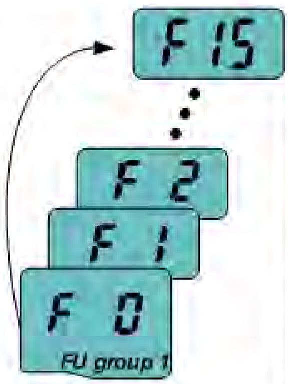



| | | |
|---|---|---|
| 1 | 0.00 | -. In the 1st code in Drive group "0.00", press the Up (▲) key once. |
| 2 | ACC | -. The 2nd code in Drive group "ACC" is displayed.<br>-. Press the Up (▲) key once. |
| 3 | dEC | -. The 3rd code "dEC" in Drive group is displayed.<br>-. Keep pressing the Up (▲) key until the last code appears. |
| 4 | drC | -. The last code in Drive group "drC" is displayed.<br>-. Press the Up (▲) key again. |
| 5 | 0.00 | -. Return to the first code of Drive group. |

♣ Use Down (▼) key for the opposite order.

- Melompat kode

When moving from the "F 0" to the "F 15" directly

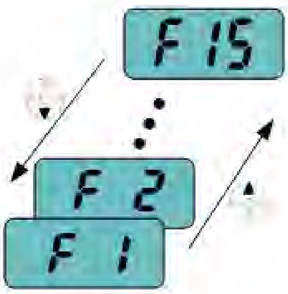



| | | |
|---|---|---|
| 1 | F 0 | -. Press the Ent (●) key in "F 0". |
| 2 | 1 | -. 1 (the code number of F1) is displayed. Use the Up (▲) key to set to 5. |
| 3 | 05 | -. "05" is displayed by pressing the Left (◄) key once to move the cursor to the left. The numeral having a cursor is displayed brighter. In this case, 0 is active.<br>-. Use the Up (▲) key to set to 1. |
| 4 | 15 | -. 15 is set.<br>-. Press the Ent (●) key once. |
| 5 | F 15 | -. Moving to F 15 has been complete. |

♣ Function group 2 and I/O group are settable with the same setting.

- Menavigasi kode didalam kelompok

When moving from F 1 to F 15 in Function group 1



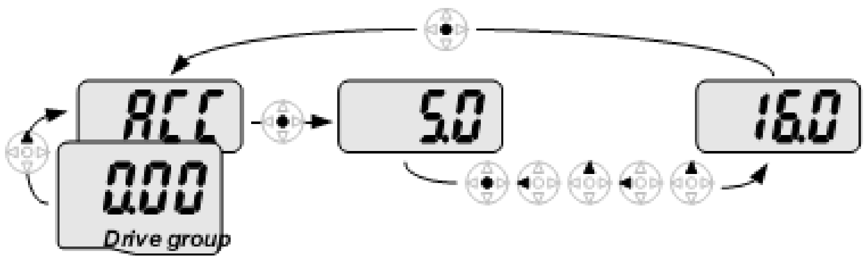

| | | |
|---|---|---|
| 1 | F 1 | -. In F 1, continue pressing the Up (▲) key until F15 is displayed. |
| 2 | F 15 | -. Moving to F15 has been complete. |

♣ The same applies to Function group 2 and I/O group.

## 13.7 Mengeset parameter

- Mengubah nilai parameter di kelompok kendali

When changing ACC time from 5.0 sec to 16.0 sec

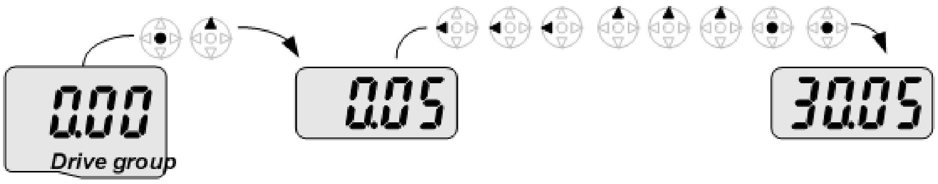



| | | |
|---|---|---|
| 1 | 0.00 | -. In the first code "0.00", press the Up (▲) key once to go to the second code. |
| 2 | ACC | -. ACC [Accel time] is displayed.<br>-. Press the Ent key (●) once. |
| 3 | 5.0 | -. Preset value is 5.0, and the cursor is in the digit 0.<br>-. Press the Left (◀) key once to move the cursor to the left. |
| 4 | 5.0 | -. The digit 5 in 5.0 is active. Then press the Up (▲) key once. |
| 5 | 6.0 | -. The value is increased to 6.0<br>-. Press the Left (◀) key to move the cursor to the left. |
| 6 | 060 | -. 0.60 is displayed. The first 0 in 0.60 is active.<br>-. Press the Up (▲) key once. |
| 7 | 16.0 | -. 16.0 is set.<br>-. Press the Ent (●) key once.<br>-. 16.0 is blinking.<br>-. Press the Ent (●) key once again to return to the parameter name. |
| 8 | ACC | -. ACC is displayed. Accel time is changed from 5.0 to 16.0 sec. |

♣ In step 7, pressing the Left (◀) or Right (▶) key while 16.0 is blinking will disable the setting.

- Menggeset frekuensi

When changing run frequency to 30.05 Hz in Drive group



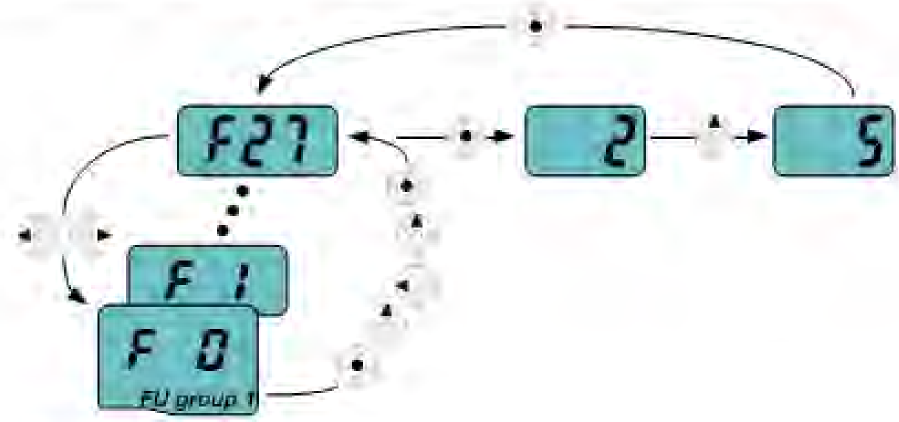

| | | |
|---|---|---|
| 1 | 0.00 | -. In "0.00", press the Ent (●) key once. |
| 2 | 0.00 | -. The second decimal **0** becomes active.<br>-. Press the UP (▲) key until 5 is displayed. |
| 3 | 0.05 | -. Press the Left (◀) key once. |
| 4 | 0.05 | -. The first decimal **0** becomes active.<br>-. Press the Left (◀) key once. |
| 5 | 0.05 | -. Press the Left (◀) key once. |
| 6 | 00.05 | -. Set 3 using UP (▲) key. |
| 7 | 30.05 | -. Press the Ent (●) key.<br>-. 30.05 is blinking.<br>-. Press the Ent (●) key. |
| 8 | 30.05 | -. 30.05 is entered into memory. |

♣ SV-iG5A display can be extended to 5 digits using left (◀)/right (▶) keys.

♣ Parameter setting is disabled when pressing other than Enter Key in step 7.

- Merubah nilai parameter kelompok input/output

When changing the parameter value of F 27 from 2 to 5



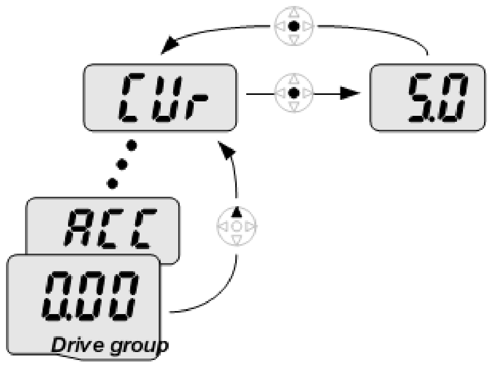

| | | |
|---|---|---|
| 1 | F 0 | -. In F0, press the Ent (●) key once. |
| 2 | 1 | -. Check the present code number.<br>-. Increase the value to 7 by pressing the Up (▲) key. |
| 3 | 7 | -. When 7 is set, press the Left (◀) key once. |
| 4 | 07 | -. 0 in 07 is active.<br>-. Increase the value to 2 by pressing the Up (▲) key. |
| 5 | 27 | -. 27 is displayed<br>-. Press the Ent (●) key once. |
| 6 | F 27 | -. The parameter number F27 is displayed.<br>-. Press the Ent (●) key once to check the set value. |
| 7 | 2 | -. The preset value 2 is displayed.<br>-. Increase the value to 5 using UP key (▲). |
| 8 | 5 | -. Press the Ent (●) key. |
| 9 | F 27 | -. Code number will appear after 5 is blinking. Parameter change is complete.<br>-. Press either Left (◀) or Right (▶) keys. |
| 10 | F 0 | -. Moving to first code of Function group 1 is complete. |

♣ The above setting is also applied to change parameter values in function group 2 and I/O group.

## 13.8 Memonitor status oprasi

- Menayangkan arus output

**Monitoring output current in Drive group**

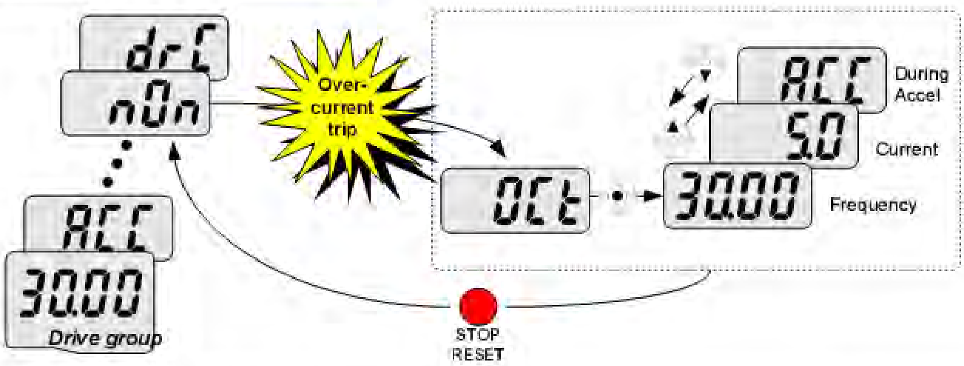



| | | |
|---|---|---|
| 1 | 0.00 | -. In [0.0], continue pressing the Up (▲) or Down (▼) key until [Cur] is displayed. |
| 2 | CUr | -. Monitoring output current is provided in this parameter.<br>-. Press the Enter (●) key once to check the current. |
| 3 | 5.00 | -. Present output current is 5 A.<br>-. Press the Enter (●) key once to return to the parameter name. |
| 4 | CUr | -. Return to the output current monitoring code. |

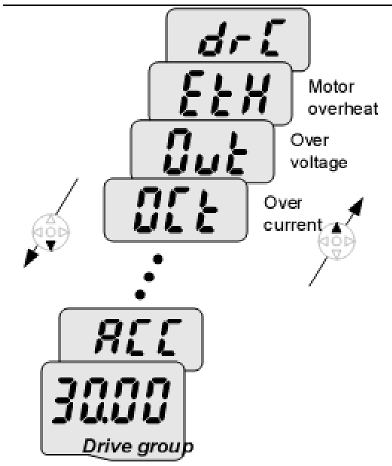
♣ Other parameters in Drive group such as dCL (Inverter DC link current) or vOL (Inverter output voltage) can be monitored via the same method.

- Menayangkan kesalahan

**How to monitor fault condition in Drive group**

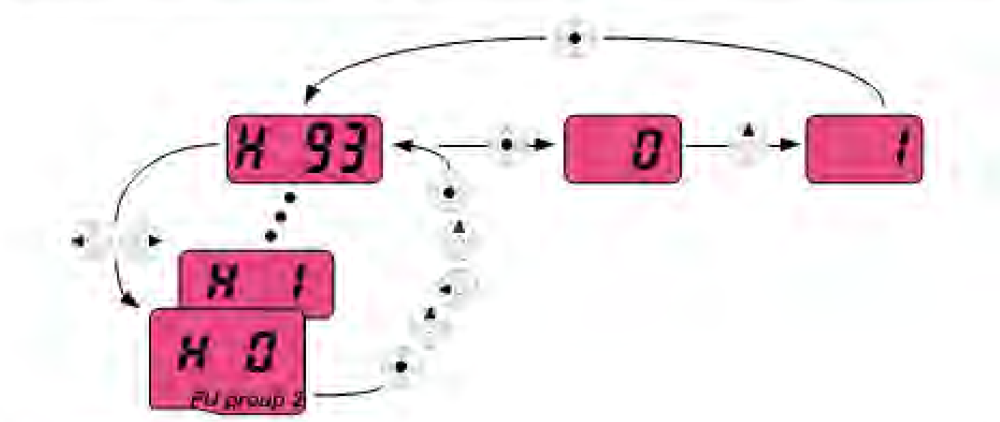



| | | |
|---|---|---|
| 1 | OCt | -. This message appears when an Overcurrent fault occurs.<br>-. Press the Enter (●) key or UP/Down key once. |
| 2 | 30.00 | -. The run frequency at the time of fault (30.0) is displayed.<br>-. Press the Up (▲) key once. |
| 3 | 5.0 | -. The output current at the time of fault is displayed.<br>-. Press the Up (▲) key once. |
| 4 | ACC | -. Operating status is displayed. A fault occurred during acceleration.<br>-. Press the STOP/RST key once. |
| 5 | nOn | -. A fault condition is cleared and "nOn" is displayed. |

| When more than one fault occurs at the same time | |
|---|---|
|  | -. Maximum three faults information is displayed as shown left. |

- Menginisiasikan parameter

How to initialize parameters of all four groups in H93




| | | |
|---|---|---|
| 1 | H 0 | -. In H0, press the Enter (●) key once. |
| 2 | 1 | -. Code number of H0 is displayed.<br>-. Increase the value to 3 by pressing the Up (▲) key. |
| 3 | 3 | -. In 3, press the Left (◀) key once to move the cursor to the left. |
| 4 | 03 | -. 03 is displayed. **0** in 03 is active.<br>-. Increase the value to 9 by pressing the Up (▲) key. |
| 5 | 93 | -. 93 is set.<br>-. Press the Enter (●) key once. |
| 6 | H 93 | -. The parameter number is displayed.<br>-. Press the Enter (●) key once. |
| 7 | 0 | -. Present setting is 0.<br>-. Press the Up (▲) key once to set to 1 to activate parameter initialize. |
| 8 | 1 | -. Press the Enter (●) key once. |
| 9 | H 93 | -. Return to the parameter number after blinking. Parameter initialize has been complete.<br>-. Press the either Left (◀) or Right (▶) key. |
| 10 | H 0 | -. Return to H0. |

# BAB XIV

## DASAR PENGOPERASIAN VFD

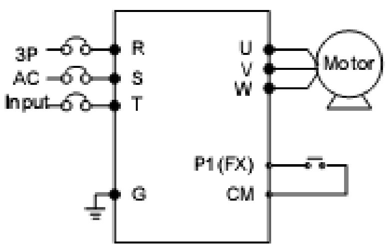
***Indikator Keberhasilan:*** *Setelah mengikuti pembelajaran ini siswa diharapkan dapat mengoperasikan VFD dengan benar sesuai SOP*

### 14.1 Mengeset frekuensi dan Operasi Dasar

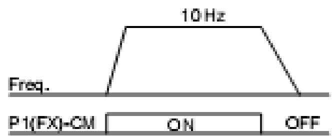
Perhatian : Menurut informasi yang diberikan pada dasarnya sebagai fakta bahwa semua parameter yang diset dari pabrikan. Hasilnya akan berbeda jika nilai parameter dirubah. Pada kasus ini, menginisialisasi nilai parameter (lihat lampiran) kembalikan pada pengesetan pabrikan dan ikuti intruksi dibawah ini.

- Mengeset frekuensi melalui keypad dan pengoperasian melalui terminal.

| | | |
|---|---|---|
| 1 | | -. Apply AC input power to the inverter. |
| 2 | 0.00 | -. When 0.00 appears, press the Ent (●) key once. |
| 3 | 0.00 | -. The second digit in 0.00 is lit as shown left.<br>-. Press the Left (◀) key three times. |
| 4 | 00.00 | -. 00.00 is displayed and the first **0** is lit.<br>-. Press the Up (▲) key. |
| 5 | 10.00 | -. 10.00 is set. Press the Ent (●) key once.<br>-. 10.00 is blinking. Press the Ent (●) key once. |
| 6 | 10.00 | -. Run frequency is set to **10.00** Hz when the blinking stops.<br>-. Turn on the switch between P1 (FX) and CM terminals. |
| 7 | 10.00 | -. RUN lamp begins to blink with FWD (Forward Run) lit and accelerating frequency is displayed on the LED.<br>-. When target run frequency 10Hz is reached, **10.00** is displayed.<br>-. Turn off the switch between P1 (FX) and CM terminals. |
| 8 | 10.00 | -. RUN lamp begins to blink and decelerating frequency is displayed on the LED.<br>-. When run frequency is reached to 0Hz, Run and FWD lamp turn off and **10.00** is displayed. |



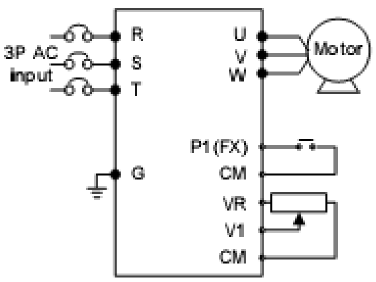

Wiring



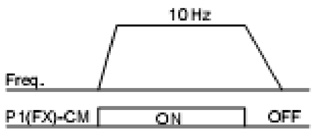

Operating pattern

- Mengeset frekuensi melalui poetnsiometer dan pengoperasian melalui terminal.

| | | |
|---|---|---|
| 1 | | -. Apply AC input power to the inverter. |
| 2 | 0.00 | -. When 0.00 appears Press the Up (▲) key four times. |
| 3 | Frq | -. Frq is displayed. Frequency setting mode is selectable.<br>-. Press the Ent (●) key once. |
| 4 | 0 | -. Present setting method is set to 0 (frequency setting via keypad).<br>-. Press the Up (▲) key three times. |
| 5 | 3 | -. After 3 (Frequency setting via potentiometer) is set, press the Ent (●) key once. |
| 6 | Frq | -. Frq is redisplayed after 3 stops blinking.<br>-. Turn the potentiometer to set to 10.00 Hz in either Max or Min direction. |
| 7 | 10.00 | -. Turn on the switch between P1 (FX) and CM (See Wiring below).<br>-. RUN lamp begins to blink with FWD lamp lit and the accelerating frequency is displayed on the LED.<br>-. When run frequency 10Hz is reached, the value is displayed as shown left.<br>-. Turn off the switch between P1 (FX) and CM terminals. |
| 8 | 10.00 | -. RUN lamp begins to blink and decelerating frequency is displayed on the LED.<br>-. When run frequency is reached to 0Hz, Run and FWD lamp turn off and **10.00** is displayed. |



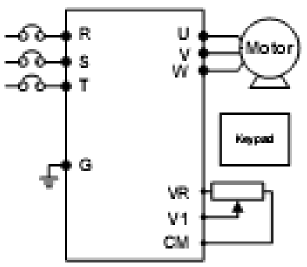

Wiring



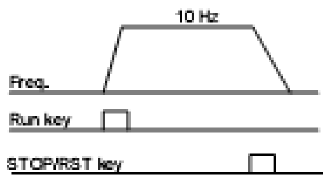

Operating pattern

- Mengeset frekuensi melalui poetnsiometer dan pengoperasian melalui Run key.

| | | |
|---|---|---|
| 1 | | -. Apply AC input power to the inverter. |
| 2 | 0.00 | -. When 0.00 is displayed, press the Up (▲) key three times. |
| 3 | drv | -. "drv" is displayed. Operating method is selectable.<br>-. Press the Ent (●) key. |
| 4 | 1 | -. Check the present operating method ("1": Run via control terminal).<br>-. Press the Ent (●) key and then Down (▼) key once. |
| 5 | 0 | -. After setting "0", press the Ent (●) key. When 0 is blinking, press the Ent again. |
| 6 | drv | -. "drv" is displayed after "0" is blinking. Operation method is set via the Run key on the keypad. -. Press the Up (▲) key once. |
| 7 | Frq | -. Different frequency setting method is selectable.<br>-. Press the Ent (●) key. |
| 8 | 0 | -. Check the present frequency setting method ("0" is run via keypad).<br>-. Press the Up (▲) key three times. |
| 9 | 3 | -. After checking "3" (frequency setting via potentiometer), press the Ent (●) key. |
| 10 | Frq | -. "Frq" is displayed after "3" is blinking. Frequency setting is set via the potentiometer on the keypad.<br>-. Turn the potentiometer to set to 10.0 Hz in either Max or Min direction. |
| 11 | 10.00 | -. Press the Run key on the keypad.<br>-. RUN lamp begins to blink with FWD lamp lit and accelerating frequency is displayed on the LED.<br>-. When run frequency 10Hz is reached, **10.00** is displayed as shown left.<br>-. Press the STOP/RST key. |
| 12 | 10.00 | -. RUN lamp begins to blink and decelerating frequency is displayed on the LED.<br>-. When run frequency is reached to 0Hz, Run and FWD lamp turn off and **10.00** is displayed. |




Wiring




Operating pattern

# BAB XV

## APLIKASI VFD

***Indikator Keberhasilan:*** *Setelah mengikuti pembelajaran ini siswa diharapkan dapat mengaplikasikan VFD dengan benar sesuai SOP*

### 15.1 Kontrol Kecepatan Motor

Motor Induksi AC (*Alternating Current*) adalah mesin dengan kecepatan konstan, dengan variasi kecepatan dari tanpa beban ke beban penuh berkisar 2 – 5%, merepresentasikan —slip” dari motor tersebut.

Kecepatan dari mesin tersebut ditentukan oleh frekuensi (f) suplai daya dan jumlah kutub (P) magnet pada statornya.

Ditentukan melalui persamaan :

$$N_s = (120.f)/P$$

$$\text{Slip (s)} = [(N_s - N_r)/N_s] \times 100\%$$

Dimana : $N_s$ = kecepatan sinkron (RPM)

$N_r$ = kecepatan rotor (RPM)

f = frequensi jala-jala (Hz)

P = Jumlah Kutub (*poles*)

Sebagian besar aplikasinya motor dengan kecepatan tetap (*fixed*) lebih banyak digunakan. Pada aplikasi atau sistem seperti ini, elemen kontrol seperti damper dan valve digunakan untuk meregulasi aliran (*flow*) dan tekanan (*pressure*). Peralatan ini biasanya menyebabkan operasi yang tidak efisien serta pemborosan energi karena aksi pembukaan dan penutupan tersebut.

Bagaimanapun, sering sangat dibutuhkan sebuah motor yang dapat beroperasi pada dua atau lebih kecepatan, atau malahan pada operasi *full variable speed*. Elemen kontrol konvensional dapat diganti dengan menerapkan operasi *variable speed* menggunakan suatu VFD.

Banyak sekali penghematan energi yang dapat dicapai pada berbagai aplikasi dengan memvariasikan kecepatan motor dan beban yang dikendalikan dengan menerapkan VFD yang tersedia secara komersial.

Penghematan termasuk dari segi *capital cost* dan biaya perawatan berkaitan dengan elemen kontrol ini.

Tabel berikut ini menunjukkan contoh-contoh beban dan kemungkinan penghematan energinya.

*Tabel 15-1. Tipe beban, aplikasi dan penghematan energi*

| Tipe Beban | Aplikasi | Pertimbangan tentang Energi |
|---|---|---|
| Beban torsi bervariasi :<br>• Daya bervariasi pada nilai pangkat tiga dari kecepatan.<br>• Torsi bervariasi pada nilai pangkat dua dari kecepatan. | • Fan sentrifugal<br>• Pompa sentrifugal<br>• Blower<br>• Sistem HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning)* | Pada kecepatan rendah terjadi penghematan energi yang signifikan sebagai akibat penurunan daya motor yang sebanding dengan pangkat tiga penurunan kecepatan. |
| Beban torsi tetap :<br>• Torsi tetap pada kecepatan motor yang bervariasi.<br>• Daya bervariasi secara langsung dengan kecepatan. | • Mixer<br>• Conveyor<br>• Kompresor<br>• *Printing Presses* | Pada kecepatan rendah terjadi penghematan energi yang berbanding lurus dengan penurunan kecepatan. |
| Beban daya tetap :<br>• Membangkitkan daya yang sama pada setiap kecepatan.<br>• Perubahan torsi berbanding terbalik dengan perubahan kecepatan. | • Peralatan-peralatan mesin<br>• Mesin bubut<br>• Mesin-mesin penggilingan<br>• *Punch presses* | Tidak ada penghematan energi pada penurunan kecepatan; akan tetapi, penghematan energi dapat dicapai dengan mengoptimasi kecepatan pemotongan dan permesinan untuk produk yang sedang diproduksi |

## 15.2 Karakteristik Beban yang dikendalikan dan Kebutuhan Daya

Perilaku dari torsi dan daya (*horsepower*) beserta kecepatan (RPM) menentukan kebutuhan dari sistem *motor-drive*.

*Horsepower = RPM * Torsi (ft-lb) / 5250*

*1 horsepower (HP) = 746 Watts = 0.746 kWatts*

maka:

*Daya (kW) = RPM * Torsi (Nm) / 9550*

Persamaan torsi diatas menyiratkan bahwa torsi berbanding lurus dengan nilai daya dan berbanding terbalik dengan kecepatan (RPM).

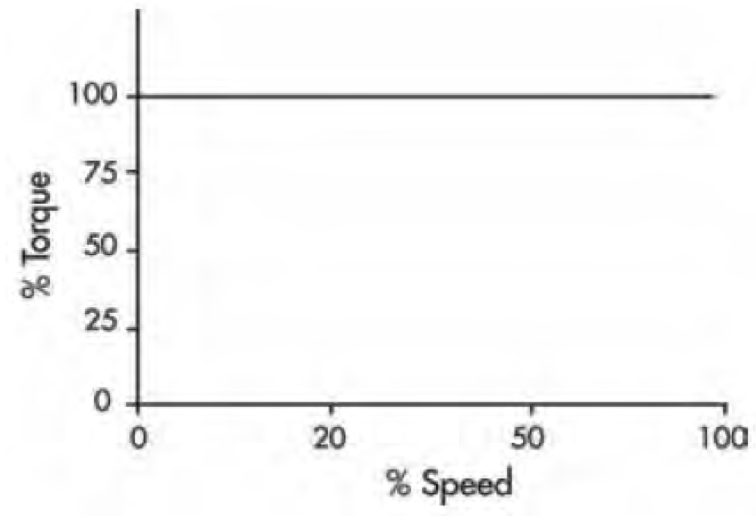
Kita dapat mengkategorikan aplikasi-aplikasi *drive* berdasarkan kebutuhan torsi operasionalnya:

- Torsi beban tetap
- Daya beban tetap
- Torsi beban bervariasi (*variable torque loads*) dimana torsi adalah jumlah gaya yang dibutuhkan beban untuk berotasi pada porosnya.
- Efisiensi motor listrik dan *drives*

### Torsi beban tetap

Torsi beban tetap meskipun terjadi perubahan kecepatan. Dengan demikian daya yang dibutuhkan adalah berbanding lurus dengan perubahan kecepatan putaran motor. Contoh-contoh tipikal aplikasi untuk torsi tetap adalah:

- *Conveyor*
- *Extruder*
- *Mixer*
- *Positive displacement pump and compressor.*

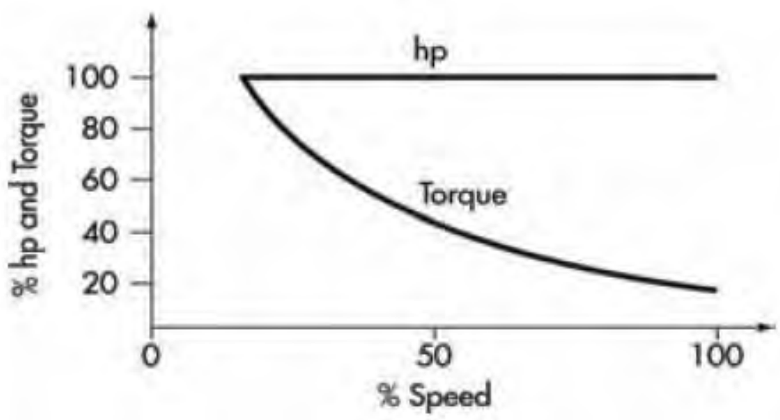



Gambar 15-1. Torsi beban tetap

Beberapa keuntungan aplikasi VFD dengan torsi tetap adalah pengendalian kecepatan dan *starting* serta *stopping* dengan percepatan / perlambatan secara presisi.

Jenis kisaran kecepatan untuk beban torsi tetap adalah 10:1. Aplikasi ini umumnya menyebabkan penghematan energi sedang pada kecepatan rendah.

**Daya (*horsepower*) beban tetap**



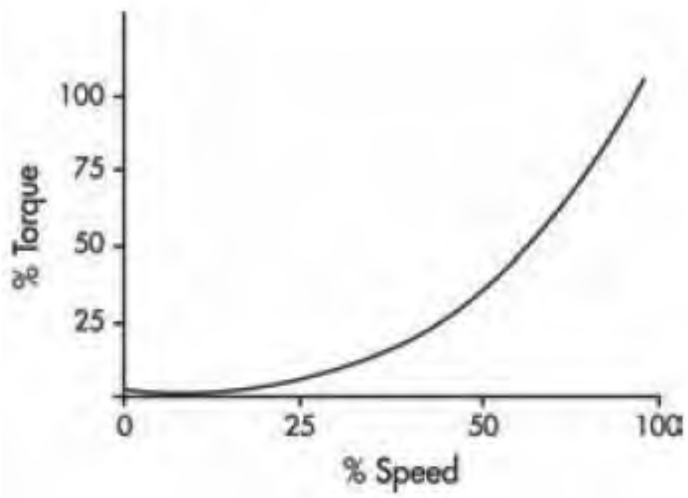

Gambar 15-2. Daya beban tetap

Jenis kedua dari karakteristik beban adalah daya tetap. Pada aplikasi ini kebutuhan torsi bervariasi secara berlawanan dengan kecepatan (torsi tinggi maka kecepatan rendah, begitupun sebaliknya). Ketika torsi bertambah maka kecepatan harus menurun untuk mendapatkan beban daya tetap. Hubungannya dapat dituliskan sebagai berikut:

*Daya = kecepatan * torsi * tetapan*

Contoh-contoh untuk tipe beban ini adalah pada mesin bubut atau pengeboron dan mesin penggilingan dimana dibutuhkan pemotongan berat pada kecepatan rendah dan pemotongan cepat ringan pada kecepatan tinggi. Aplikasi ini tidak menawarkan penghematan energi pada penurunan kecepatan.

**Beban torsi bervariasi**




Gambar 15-3. Beban torsi bervariasi

Tipe ketiga dari karakteristik beban adalah beban torsi bervariasi. Contohnya *Centrifugal fans, blowers* dan pompa. Penggunaan VFD dengan beban torsi bervariasi memberikan penghematan energi yang signifikan.

Pada aplikasi ini:

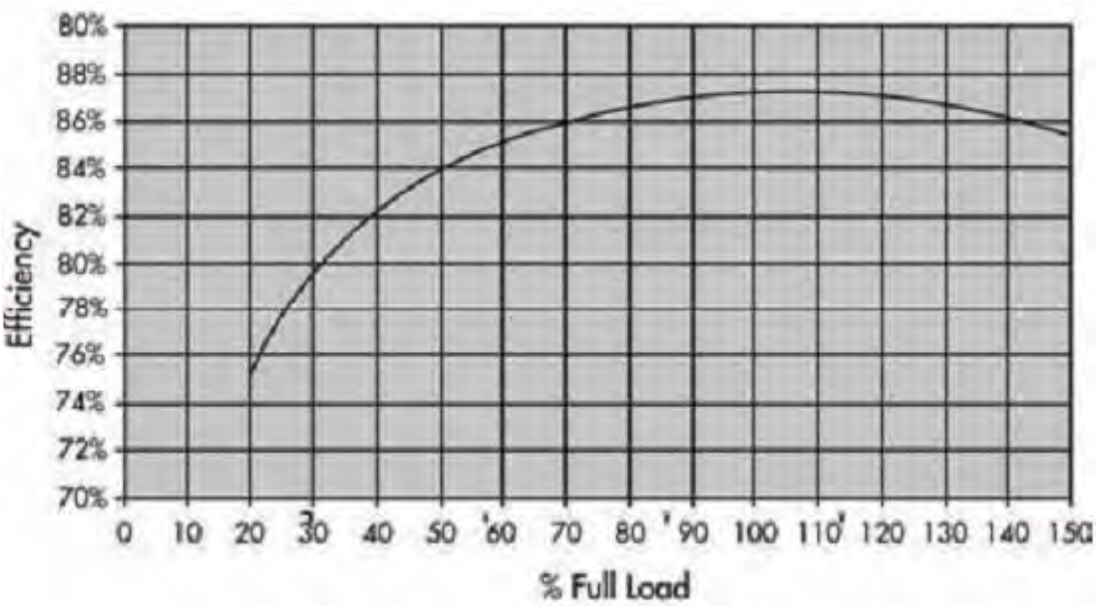
- Torsi bervariasi secara lansung dengan kuadrat kecepatan.
- Daya bervariasi secara langsung dengan pangkat tiga kecepatan.

Ini berarti pada kecepatan setengah (½), daya yang dibutuhkan adalah sekitar seperdelapan (1/8) dari nilai maksimum.

Sebuah VFD mereduksi total energi yang masuk ke sistem jika tidak dibutuhkan.

**Efisiensi motor listrik dan pengendali**

Efisiensi dari motor listrik AC pada beban penuh berkisar pada nilai 80% untuk motor-motor kecil ke nilai lebih dari 95% untuk motor berdaya lebih dari 100 HP. Efisiensi sebuah motor listrik menurun signifikan seiring dengan penurunan beban dibawah 40%. Maka disarankan bahwa motor yang digunakan dapat beroperasi pada beban penuh dengan nilai daya 75% dari nilai daya motor. Gambar 15-4. mununjukkan tipikal kurva efisiensi motor vs. pembebanan.




Gambar 15-4. Tipikal efisiensi dari motor induksi standar 10 HP efisiensi vs. beban

Efisiensi motor listrik dan sistem *drive* adalah rasio dari daya *output* mekanik dengan *input* daya dan umumnya direpresentasikan dalam persentase.

**Efisiensi sistem motor** = (Output(mekanik)/Input(electrical)) * 100%

Sebuah VFD sangat efisien. Tipikal efisiensinya 97% atau lebih untuk beban penuh. Efisiensinya turun saat beban juga menurun. Secara khusus, VFD diatas 10 HP memiliki efisiensi lebih dari 90% untuk beban lebih besar dari 25% beban penuh.

Tabel 15-2. Efisiensi VFD

| PWM VFD Efficiency as a Function of VFD Power Rating | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| VFD HP rating | Efficiency %<br>Load, Percent of Drive Rated Power Output | | | | |
| | 12.5 | 25 | 50 | 75 | 100 |
| 1 | .48 | .74 | .84 | .87 | .89 |
| 5 | .80 | .88 | .92 | .94 | .95 |
| 10 | .83 | .90 | .94 | .95 | .96 |
| 25 | .88 | .93 | .95 | .96 | .97 |
| 50 | .86 | .92 | .95 | .96 | .96 |
| 75 | .86 | .94 | .97 | .97 | .97 |
| 100 | .89 | .94 | .96 | .96 | .97 |
| 200 | .91 | .95 | .96 | .97 | .97 |

Tabel berikut menunjukkan efisiensi VFD pada beban yang bervariasi. Efisiensi sistem lebih rendah daripada efisiensi produk motor dan VFD karena efisiensi motor bervariasi dengan beban dan karena adanya efek harmonik pada motor.

Sayangya, hampir tidak mungkin untuk mengetahui akan berapakah nilai efisiensi motor/*drive*, tetapi karena daya input ke sebuah sistem torsi bervariasi (*variable torque*) menurun sesuai dengan kecepatan, sehingga perkiraan dari efisiensi sistem adalah hal yang dapat dilakukan.

Ketika menghitung konsumsi energi dari sebuah sistem *motor drive*, tetapkan efisiensi sistem pada range 80 – 90 % untuk motor 10 HP atau lebih dan beban 25% atau lebih.

Pada umumnya, area efisiensi yang rendah berkorespondensi untuk motor ukuran kecil  serta beban kecil dan area efisiensi tinggi berkorespondesi untuk motor ukuran besar serta beban besar.

### 15.3 Pemilihan VFD

Berikut adalah langkah-langkah pemilihan VFD:

- Menetapkan spesifikasi awal untuk aplikasi drive

  Untuk memilih kombinasi motor dan VFD yang tepat, informasi berikut sebaiknya tersedia:

  - ✓ Tegangan (Volt) dan frekuensi (Hz) sumber listrik.
  - ✓ Torsi *start* (Newton meters).
  - ✓ Torsi beban (Newton meters) dan hubungannya dengan kecepatan.
  - ✓ Rentang kecepatan (rev/min).
  - ✓ Nilai percepatan yang dibutuhkan.
  - ✓ Momen inersia motor dan beban (kgm^2).

- Pemilihan jumlah *pole* (kutub) motor

  Pemilihan jumlah *pole* ini berkaitan dengan pemilihan kecepatan putaran motor yang akan digunakan.

- Menentukan nilai daya (*power*) motor

  Nilai daya motor dihitung berdasarkan persamaan berikut

  *Power* = (Torsi (Nm) * kecepatan(rev/min)) / 9550  kW

  **torsi disini adalah torsi mekanik, dan kecepatan adalah kecepatan putaran.*

- Langkah berikutnya adalah memilih VFD yang sesuai dengan spesifikasi kebutuhan.

  Dalam pemilihannya faktor-faktor berikut patut dipertimbangkan:

- Tegangan dan frekuensi suplai listrik.
- Nilai arus listrik motor.
- *Duty type* (*Variable torque* atau *constant torque*).

VFD yang dipilih memiliki nilai arus listrik yang lebih tinggi dengan nilai arus listrik motor.

**TUGAS PRAKTEK 1 : KARAKTERISTIK MOTOR DENGAN MENERAPKAN VFD**

**Tujuan:**

Setelah melakukan tugas praktek ini anda diharapkan mampu:

- Memahami karakteristik motor (kecepatan, daya, dan torsi) dengan menerapkan VFD.

**Petunjuk:**

1. Saat membangun rangkaian semua peralatan pada posisi OFF.
2. Catat data kapasitas motor dan pilih alat-alat ukur yang tepat berdasarkan jangkauan/batas nilai yang diukur.
3. Saat menghubungkan rangkaian ke sumber tegangan/uji coba system VFD minta persetujuan instruktur.
4. Ikuti dengan seksama langkah kerja, agar anda dan peralatan terhindar dari kecelakaan.

**Alat dan Bahan:**

1. Motor induksi 3 fasa 0,75 kW (1 HP)
2. VFD Altivar 18 atau LS IG5A
3. Watt – meter
4. Tachometer
5. Potensiometer
6. Kabel penghubung

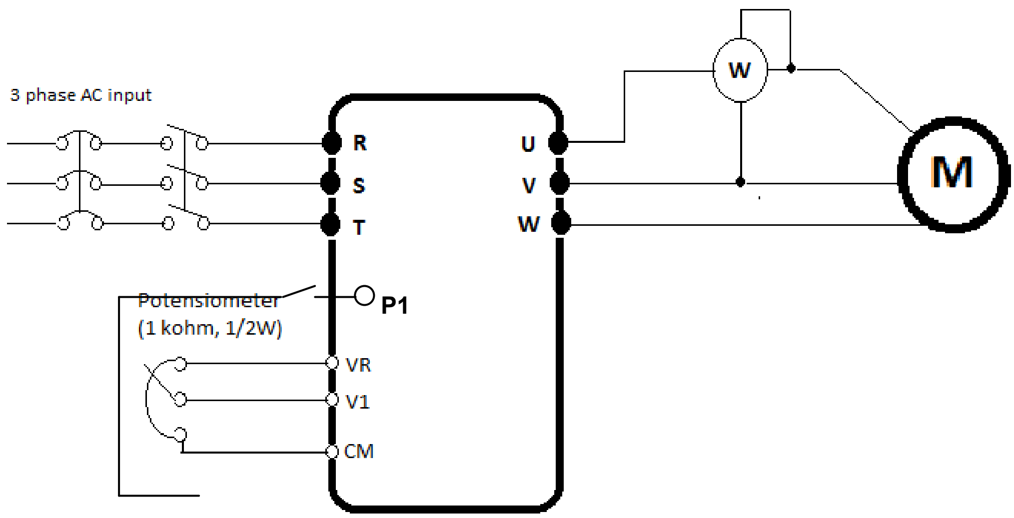
**Langkah Kerja:**

1. Cermati gambar rangkaian dengan seksama, dan persiapkan bahan dan peralatan yang dibutuhkan.
2. Bangun rangkaian sesuai gambar percobaan, setelah selesai dan disetujui instruktur, sambungkan rangkaian ke tegangan sumber.
3. Amati penunjukan Watt - meter dan nilai frekuensi keluaran VFD ke motor listrik.

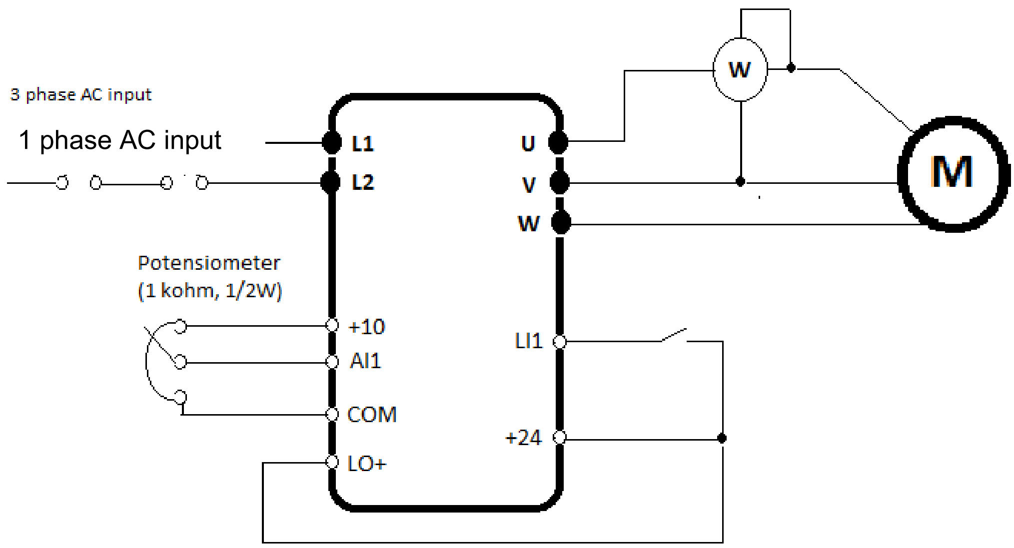
4. Atur putaran motor dengan mengatur nilai frekuensi (0 s/d nilai frekuensi pada nameplate motor) keluaran VFD ke motor listrik. Tiap tahap catat penunjukkan alat ukur pada tabel di bawah.
5. Setelah selesai melakukan pengukuran, switch OFF semua saklar-saklar.
6. Setelah selesai melakukan percobaan, kembalikan peralatan ke tempatnya semula.

**Gambar Rangkaian:**

a. VFD LS SV-IG5A




b. VFD Altivar 18



**Tugas:**

1. Catat data hasil pengukuran pada tabel.
2. Analisislah kemampuan daya output VFD Altivar 18 dan SV-iG5A
3. Jelaskan pengaruh v/f dari sumber output Altivar jika dihubungkan dengan motor induksi 3 fasa !
4. Buatlah kesimpulan !

TABEL PERCOBAAN

| **Pengukuran** | | | |
|---|---|---|---|
| Frekuensi (Hz) | Tegangan Line ($U_L$) | Kecepatan (RPM) | Daya (W) |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

## TUGAS PRAKTEK 2 : KARAKTERISTIK INVERTER ALTIVAR 18

**Tujuan:**

Setelah melakukan praktek diharapkan petatar mampu :

1. Merangkai rangkaian catu daya untuk pengendalian motor induksi dengan inverter Altivar 18.
2. Mengoperasikan pengaturan motor induksi dengan inverter Altivar 18.
3. Menganalisis karakteristik catu daya untuk pengendalian motor induksi dengan inverter Altivar 18.

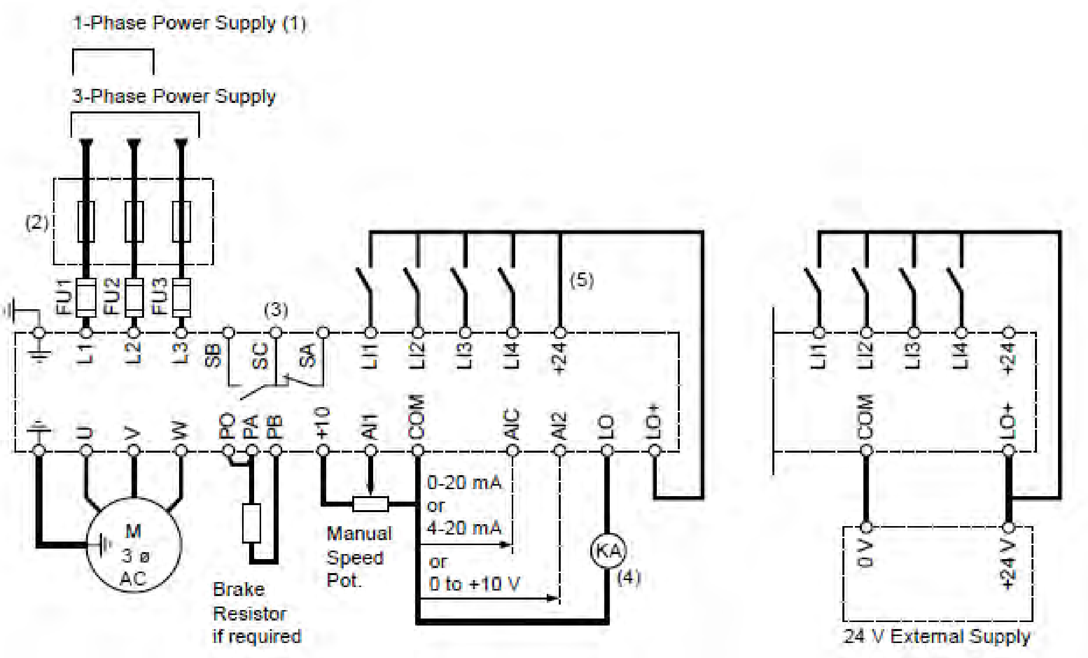
**Petunjuk:**

1. Sebelum melaksanakan tugas praktek ini, pelajarilah terlebih dahulu petunjuk penggunaan inverter Altivar 18 serta keamanan operasinya (Manual book).
2. Periksa semua peralatan sebelum digunakan, apakah bekerja dalam keadaan baik.
3. Jangan mengoperasikan peralatan tanpa persetujuan instruktur.

**Alat dan Bahan:**

1. Modul Altivar 18
2. Multimeter
3. Frekuensi-meter
4. Watt-meter
5. Tacho-meter
6. Kabel penghubung

**Rangkaian Percobaan:**




**Langkah Kerja :**

- **Prosedur Awal**
  1. Cermati terminal-terminal pada unit Altivar 18 sesuai Gambar Rangkaian Percobaan di atas.
  2. Pelajari dengan seksama **<u>Prosedur Operasi Altivar 18</u>** ini sebagaimana terlampir.
  3. Rangkailah unit Altivar sesuai dengan gambar rangkaian.
  4. Cermati pemasangan : ***brake resistor*** **(jika di perlukan), Potensiometer, Switch S1, S2, S3, S4**
  5. Perhatikan hirarki untuk mengakses parameter pada Altivar 18 dan fungsinya.
  6. Lakukan setting semua parameter dar I Altivar 18 pada kondisi setting pabrik *(factory preset)*.

- **Mengubah Operasi Frekuensi :**
  1. Hubungkan selektor sumber pada posisi 1fasa (1 PH) 220 V
  2. Set-lah frekuensi keluaran maksimum Altivar dengan mengatur parameter *tFr*, tentukan sebesar 150 Hz.

3. Set-lah parameter *LSP* (putaran motor terendah) pada 0,0 Hz dan *HSP* (putaran motor tertinggi) pada 150 Hz.
4. Kembalikan parameter pada posisi *rdy*.
5. Tekan tombol START, ON-kan sakelar S1, kemudian :
   - Atur parameter *FrH* (frekuensi setpoin) secara bertahap sesuai Tabel dengan mengatur potensiometer.
   - Ukurlah tegangan output Altivar untuk setiap tahapan frekuensi setpoin
6. Kembalikan parameter pada posisi *rdy*.
7. Tekan tombol STOP.
8. Lakukan seperti langkah 5 sampai dengan 7 di atas.

**Tugas :**

1. Analisislah kemampuan daya output Altivar.
2. Jelaskan pengaruh v/f dari sumber output Altivar jika dihubungkan dengan motor induksi 3 fasa.

**TUGAS PRAKTEK 3 : KENDALI MOTOR INDUKSI TANPA BEBAN DENGAN INVERTER ALTIVAR 18.**

**Tujuan:**

Setelah melakukan praktek diharapkan petatar mampu :

1. Mengoperasikan pengaruh arus dan waktu pengereman injeksi *(Idc dan tdc)* terhadap putaran motor induksi 3 fasa.
2. Mengoperasikan pengaruh waktu akselerasi dan deakselerasi *(ACC dan dEC)* terhadap putaran motor induksi 3 fasa.

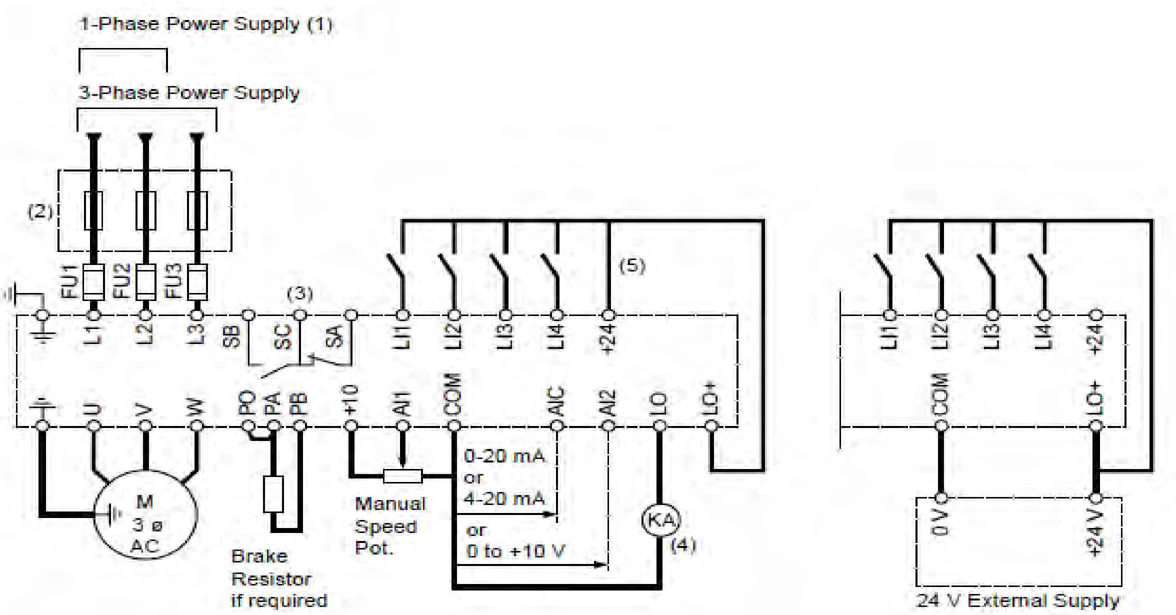
**Petunjuk:**

1. Sebelum melaksanakan tugas praktek ini, pelajarilah terlebih dahulu petunjuk penggunaan inverter Altivar 18 serta keamanan operasinya (Manual book).
2. Periksa semua peralatan sebelum digunakan, apakah bekerja dalam keadaan baik.
3. Jangan mengoperasikan peralatan tanpa persetujuan instruktur.

**Alat dan Bahan:**

1. Modul inverter Altivar 18
2. Motor Induksi 3 fasa 220/380 V, 0,75 KW
3. Multimeter
4. Frekuensi-meter
5. Watt-meter
6. Tacho-meter
7. Kabel penghubung.

**Rangkaian Percobaan:**




**Langkah Kerja :**

- Cermati terminal-terminal pada unit Altivar 18 sesuai Gambar Rangkaian Percobaan di atas.
- Rangkailah unit Altivar 18 sesuai dengan Gambar Rangkaian.
- Cermati pemasangan : ***brake resistor*** **(jika di perlukan), Potensiometer, Switch S1, S2, S3, S4**
- Rangkailah motor induksi 3 fasa dengan sambungan bintang ( Y ), kemudian hubungkan dengan Altivar 18.

**<u>Percobaan 1</u> : Mengoperasikan Altivar dengan Motor Induksi tanpa Beban**

1. Hubungkan selektor sumber pada posisi 1 fasa (1PH) dengan tegangan 220 V.
2. Kembalikan semua parameter pada kondisi preset.
3. Set-lah parameter arus, tegangan, dan frekuensi nominal dari motor induksi 3 fasa pada Altivar *(ItH, UnS, dan FrS)*
4. Set-lah frekuensi keluaran maksimum Altivar dengan mengatur parameter *tFr*, tentukan sebesar 150 Hz.
5. Set-lah parameter *LSP* (putaran motor terendah) pada 0,0 Hz dan *HSP* (putaran motor tertinggi) pada 150 Hz.

6. Kembalikan parameter pada posisi *rdy*.
7. Tekan tombol START, ON-kan sakelar S1, kemudian :
   - Atur parameter *FrH* (frekuensi setpoin) secara bertahap sesuai Tabel Percobaan atau dengan mengatur potensiometer.
   - Ukurlah frekuensi, tegangan, arus, dan putaran motor untuk setiap tahapan frekuensi setpoin
8. Tekan tombol STOP.
9. Ulangi langkah 6 sampai dengan 7.

**<u>Percobaan 2</u> : Mengoperasikan Arus dan Waktu Injeksi, serta waktu Akselerasi dan Deakselerasi**

1. Jangan diubah setting parameter pada percobaan 1.
2. Atur setting *Idc, tdc, ACC, dEC* dari kondisi factory preset sampai dengan minimumnya sebanyak 5 tahapan.
3. Lakukan langkah 6 sampai dengan 9 dari percobaan 1 di atas.

**Tugas :**

1. Jelaskan pengaruh perubahan v/f dari sumber output Altivar terhadap putaran motor !
2. Jelaskan pengaruh perubahan frekuensi dan *Idc, tdc, ACC,* serta *dEC* terhadap putaran motor !
3. Jelaskan hubungan pengaruh *Idc, tdc, ACC,* dan *dEC* terhadap pengereman motor !

**TUGAS PRAKTEK 4 : Forward-Reverse Motor**

***Kasus 1*: Lift (Elevator) pengangkat barang**

**Langkah 1:** Memahami sistem yang harus dikendalikan

Pada contoh kasus ini, diberikan suatu sistem Lift pengangkat barang yang digerakan turun naik dengan motor sebagai tenaga penggerak. Lift bergerak naik dari Lantai dasar ke Lantai 1, dan apabila posisinya mencapai Lantai 1 maka motor berhenti dan begitupun ketika bergerak turun dan telah mencapai posisi Lantai dasar motor berhenti. Seperti diperlihatkan berikut ini:



Gambar 4-1. Sistem Lift (elevator).

**Langkah 2:** Memahami variable yang dikendalikan

Sistem Lift pengangkat barang (gambar 4-1) mengendalikan pergerakan motor Forward-Reverse, Serta dilengkapi dengan dua buah *push-button switch* sebagai input, switch 1 untuk *Forward* dan switch 2 untuk *reverse*

dan dilengkapi dengan 2 (dua) buah limit switch. Terdapat dua buah variable output yang harus dikendalikan berupa arah perputaran motor.

**Langkah 3:** Memahami Persyaratan Teknis yang diinginkan

- Akselerasi pertambahan kecepatan dari 0 sampai preset value yang diinginkan (lakukan setting parameter akselerasi/Ramp times pada VFD). Pada kasus ini ditetapkan Ramp times 10 Hz/sekon dan preset value adalah 50 Hz. Torsi dianggap konstan.
- Dibuat default di VFD untuk pengaman over current.

**Langkah 4:** Wiring dan Commissioning

Pada bagian ini tahap-tahap yang harus dilakukan adalah:

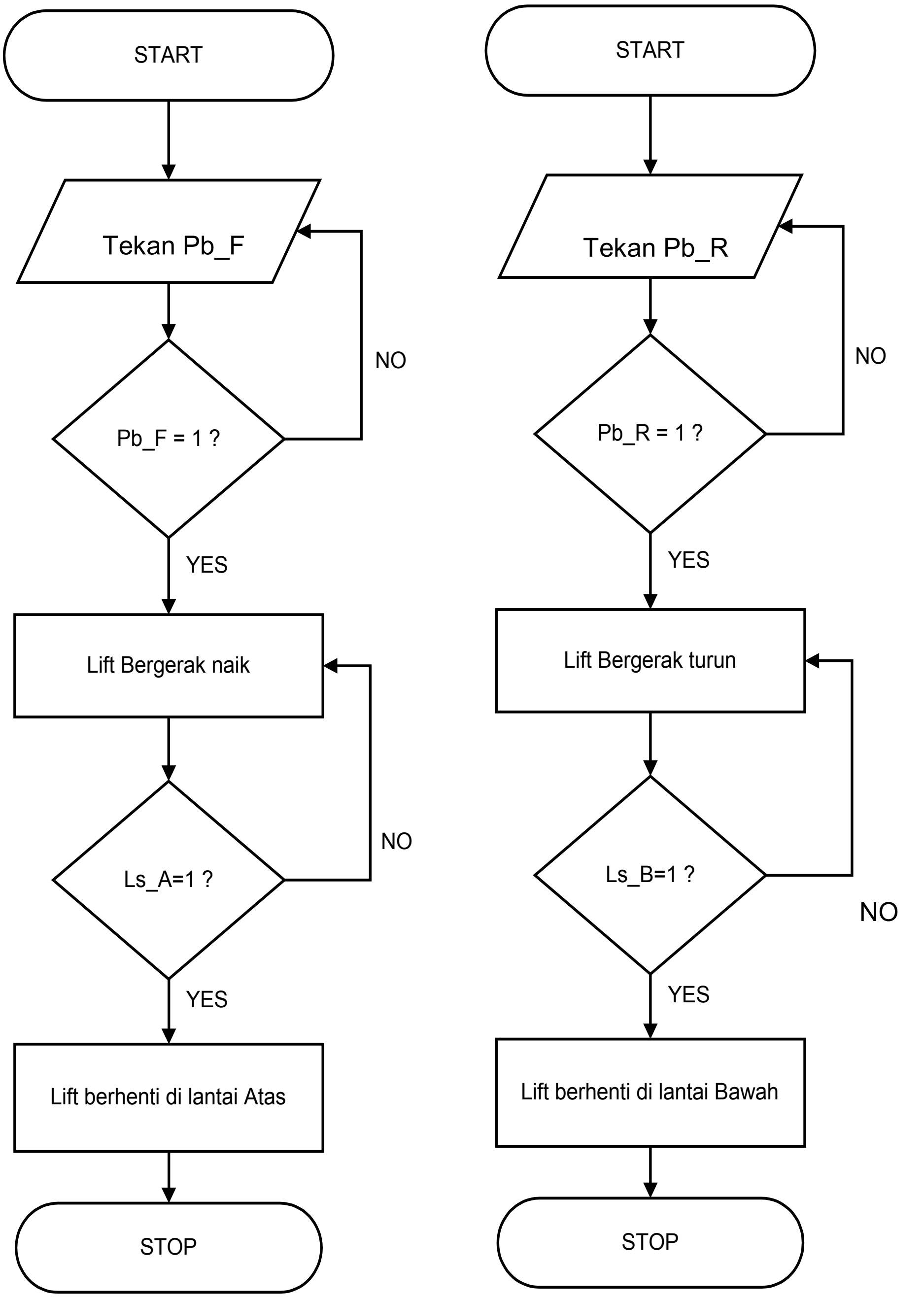
1. Buatlah Algoritma Kontrol
2. Buat rangkaian pengawatan dan Commissioning
3. Buat Diagram dan Program Kontrol
4. Tes I/O

**Lembar Tugas**

Implementasikan hasil rancangan kasus 1: Sistem Lift (elevator) pengangkat barang. Dengan ketentuan sebagai berikut :

1. Baca petunjuk keamanan (Safety) pengoperasian VFD.
2. Buatlah sketsa rangkaian pengawatan dan Commissioning dengan memperhatikan sistem wiring dan setting Value VFD pada manual book VFD Altivar 18 dan LS-IG5A pada lampiran.
3. Buat Program Kontrol dengan menggunakan relai dan menggunakan Programmable Logic Control (PLC).
4. Buatlah operator interface.
5. Tes I/O, didemonstrasikan kepada Guru Praktek.

**Contoh algoritma** untuk kasus 1, menggunakan *flowchart*:

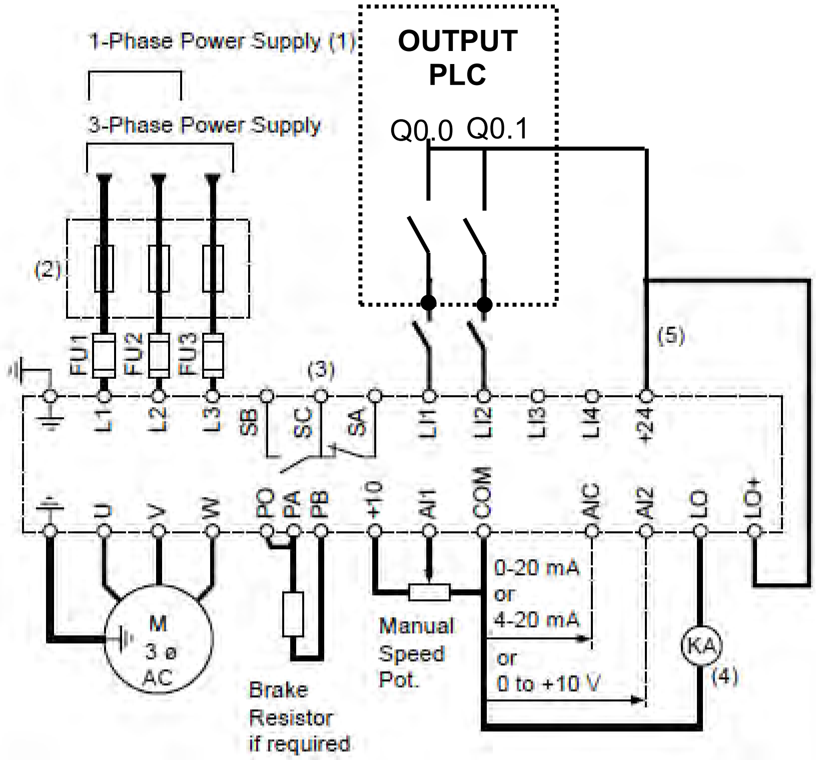



(a) (b)

Gambar 4-2. *flowchart control lift* (a) pergerakan naik (b) pergerakan turun.

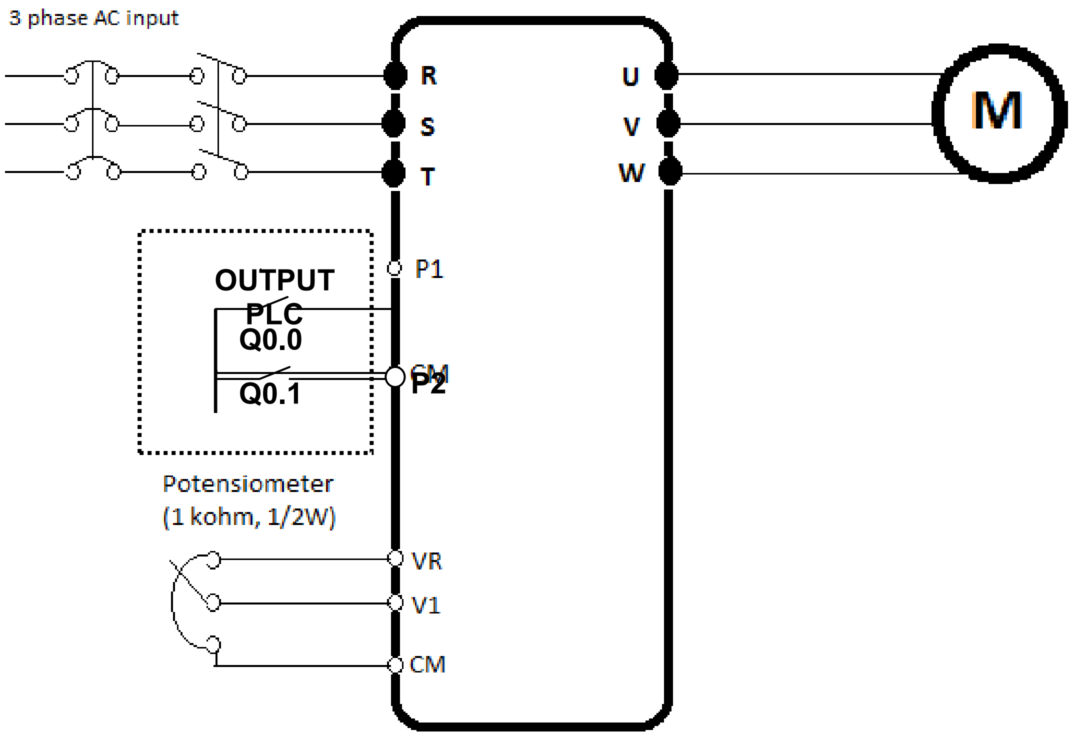
- **Diagram pengawatan control VFD**

a. Menggunakan VFD Altivar 18




Gambar 4-4. Rangkaian pengawatan Output PLC dengan VFD Altivar 18

b. Menggunakan VFD LS SV-iG5A




Gambar 4-5. Rangkaian pengawatan Output PLC dengan VFD SV-iG5A

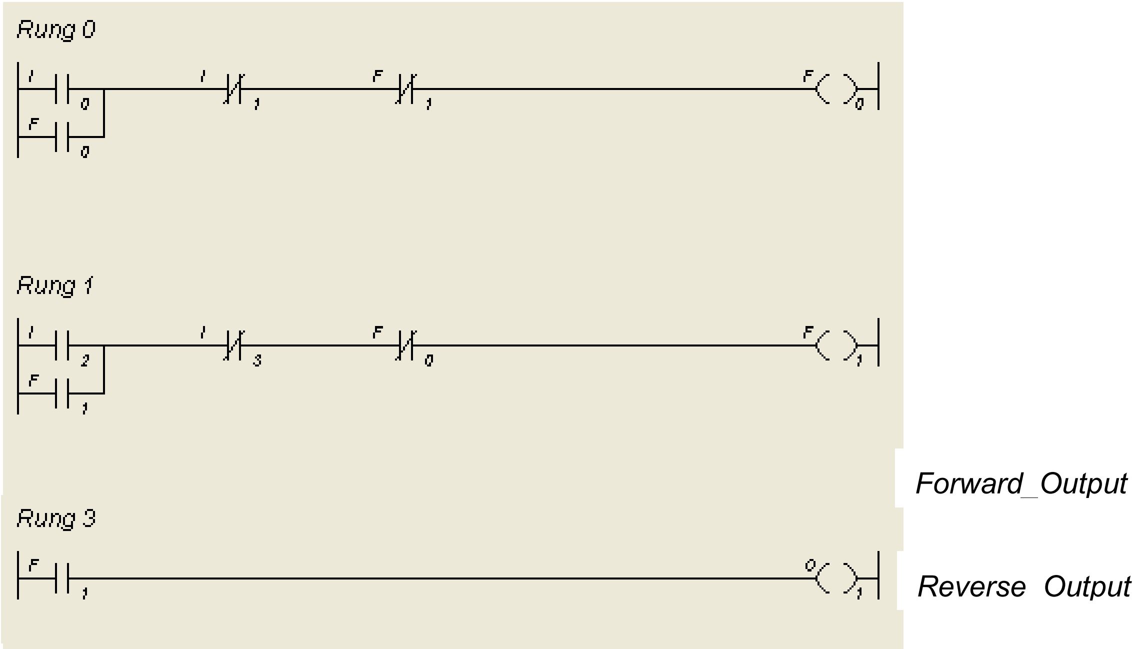
## A. Implementasi Kontrol Menggunakan PLC (Program Kontrol)

**Tabel 4-2. Tabel Kebutuhan I/O**

Tabel Pengadresan I/O

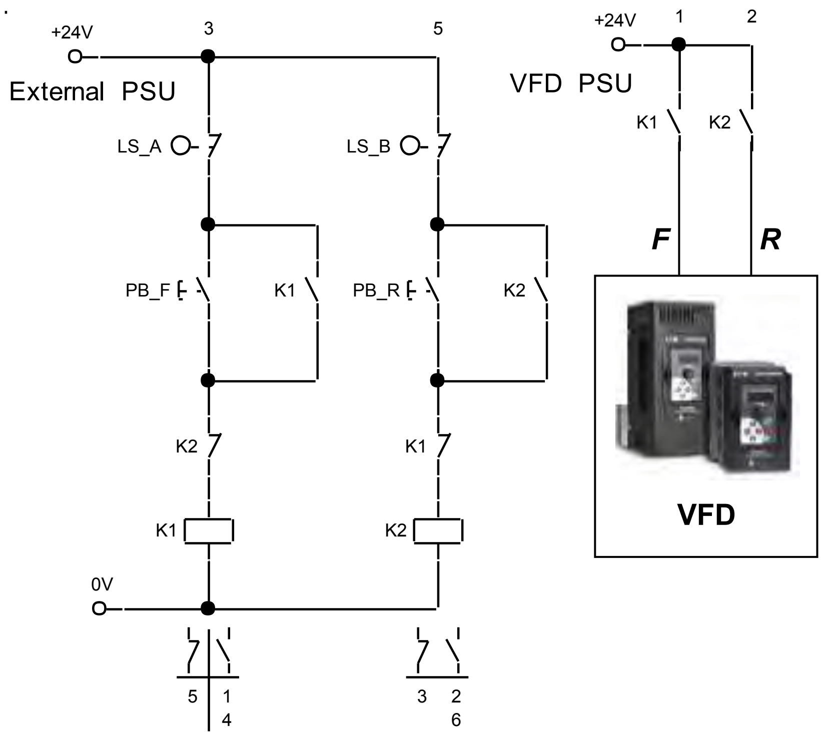
| alamat | Deskripsi | Nama Simbol |
|---|---|---|
| Q0.0 | Forward Output (Pergerakan ke atas) | Forward_M |
| Q0.1 | Reverse Output (Pergerakan ke bawah) | Reverse_M |
| I0.0 | Pushbutton Forward | Pb_F |
| I0.1 | Limit Switch Atas | Ls_A |
| I0.2 | Pushbutton Reverse | Pb_R |
| I0.3 | Limit Switch Bawah | Ls_B |
| M0.0 | Work bit untuk melewatkan sinyal dari Pushbutton Forward | M0 |
| M0.1 | Work bit untuk melewatkan sinyal dari Pushbutton Reverse | M1 |

Contoh program control, yang ditulis dengan Software LADSIM3D Simulator.




Gambar 4-6. Program Kontrol Forward-Reverse Motor dalam Ladder Diagram

**B. Implementasi Kontrol Berbasis Relai (Diagram Kontrol)**




Gambar 4-7. Diagram Kontrol Forward-Reverse Motor

***Kasus 2* : Pengaturan Speed motor konveyor**

**Langkah 1:** Memahami sistem yang harus dikendalikan

Sistem konveyor memiliki kecepatan yang dapat diatur, motor tersebut terhubung ke rotary encoder yang dapat menampilkan kecepatan putaran motor dalam rotasi per menit (RPM). Sehingga operator dapat dengan mudah untuk mengatur speed motor sesuai keinginan. Sistem Konveyor ditunjukan pada gambar berikut :



Gambar 4-8. Motor Konveyor dilengkapi rotary encoder

**Langkah 2:** Memahami variable yang dikendalikan

Motor Konveyor (gambar 2.28) dikendalikan berdasarkan perubahan frekuensi motor, perubahan ini berdasarkan pengaturan tegangan analog input DC (potensiometer) antara 0 s.d 10 Volt pada VFD secara manual. Semakin naik frekuensi maka kecepatan motor bertambah. Besarnya perubahan frekuensi dapat dilihat pada display VFD maupun di Operator Interface.

**Langkah 3:** Memahami Persyaratan Teknis yang diinginkan

- Besarnya Torsi motor harus dipertahankan

**Langkah 4:** Wiring dan Commissioning

Pada bagian ini tahap-tahap yang harus dilakukan adalah:

1. Buatlah Algoritma Kontrol
2. Buat rangkaian pengawatan dan Commissioning

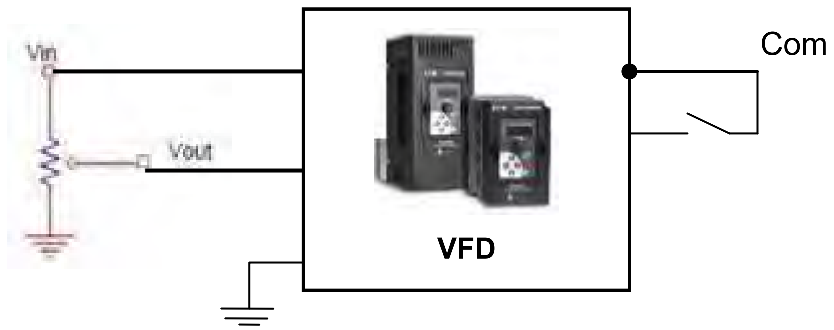
3. Buat Diagram dan Program Kontrol
4. Tes I/O ,didemonstrasikan kepada Guru Praktek.

**Lembar Tugas**

Implementasikan hasil rancangan kasus 2: Motor Konveyor. Dengan ketentuan sebagai berikut :

1. Baca petunjuk keamanan (Safety) pengoperasian VFD.
2. Buatlah sketsa rangkaian pengawatan dan Commissioning dengan memperhatikan sistem wiring dan setting Value VFD pada manual book VFD Altivar 18 dan LS-IG5A pada lampiran.
3. Buat Program Kontrol dengan menggunakan relai dan menggunakan Programmable Logic Control (PLC).
4. Buatlah Operator Interface.
5. Tes I/O, didemonstrasikan kepada Guru Praktek.

**Gambar Rangkaian :**




Gambar 4-9. Pengaturan Speed dengan Potensiometer pada VFD

***Kasus 3*** **: Mesin Bubut**



Gambar 4-10. Pengaturan Speed mesin bubut

**Langkah 1:** Memahami sistem yang harus dikendalikan

Mesin bubut memiliki kecepatan yang dapat diatur, motor tersebut diset pada 3 (tiga) kecepatan, 500 rpm, 1200 rpm dan 1650 rpm.

**Langkah 2:** Memahami variable yang dikendalikan

Mesin bubut (gambar 2.30) dikendalikan berdasarkan perubahan frekuensi motor, perubahan ini berdasarkan pengaturan kecepatan yang dikendalikan melalui PLC. Dimana terdiri dari 2 buah Push button switch : Start_Stop dan 4 buah Toggle Switch: Forward, Speed_1, Speed_2, dan Speed_3. Serta dapat dilengkapi tombol Emergency Stop.

**Langkah 3:** Memahami Persyaratan Teknis yang diinginkan

- Memiliki daya konstan pada setiap kecepatan

**Langkah 4:** Wiring dan Commissioning

Pada bagian ini tahap-tahap yang harus dilakukan adalah:

1. Buatlah Algoritma Kontrol
2. Buat rangkaian pengawatan dan Commissioning
3. Buat Diagram dan Program Kontrol
4. Tes I/O ,didemonstrasikan kepada Guru Praktek.

**Lembar Tugas**

Implementasikan hasil rancangan kasus 3: Mesin Bubut. Dengan ketentuan sebagai berikut :

1. Baca petunjuk keamanan (Safety) pengoperasian VFD.
2. Buatlah sketsa rangkaian pengawatan dan Commissioning dengan memperhatikan sistem wiring dan setting Value VFD pada manual book VFD Altivar 18 dan LS-IG5A pada lampiran.
3. Buat Program Kontrol dengan menggunakan relai dan menggunakan Programmable Logic Control (PLC).
4. Buatlah Operator Interface.
5. Tes I/O, didemonstrasikan kepada Guru Praktek.

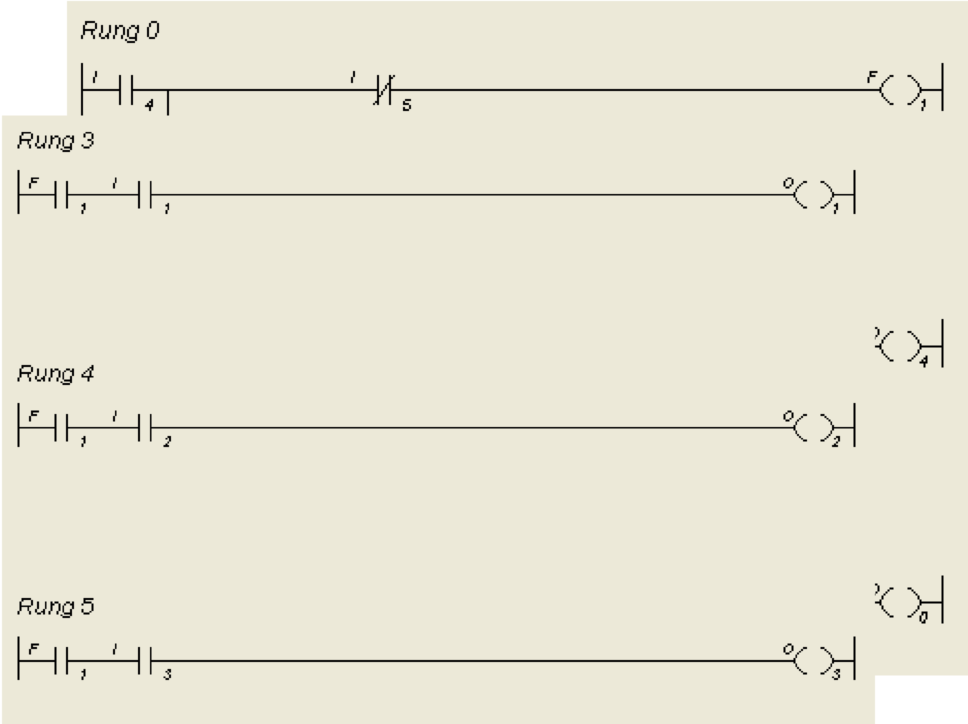
## A. Implementasi Program Kontrol Menggunakan PLC

**Tabel 2.3 Tabel Kebutuhan I/O**

Tabel I/O

| alamat | Deskripsi | Nama Simbol |
|---|---|---|
| Q0.0<br>Q0.1<br>Q0.2<br>Q0.3 | Forward Output<br>Speed1 (500 rpm)<br>Speed2 (1200 rpm)<br>Speed3 (1650 rpm) | Forward_M<br>Speed_1<br>Speed_2<br>Speed_3 |
| I0.0<br>I0.1<br>I0.2<br>I0.3<br>I0.4<br>I0.5 | Toggle_Forward<br>Toggle_Speed1<br>Toggle_Speed2<br>Toggle_Speed3<br>Pushbutton_Start<br>Pushbutton_Stop | Tog_F<br>Tog_S1<br>Tog_S2<br>Tog_S3<br>Pb_ON<br>Pb_OFF |
| F1<br>Q0.4 | Work bit untuk status ON<br>Lampu Indikator Power | F1<br>Power_ON |

Program menggunakan LAD SIM untuk mengoperasikan VFD LS SV-IG5A



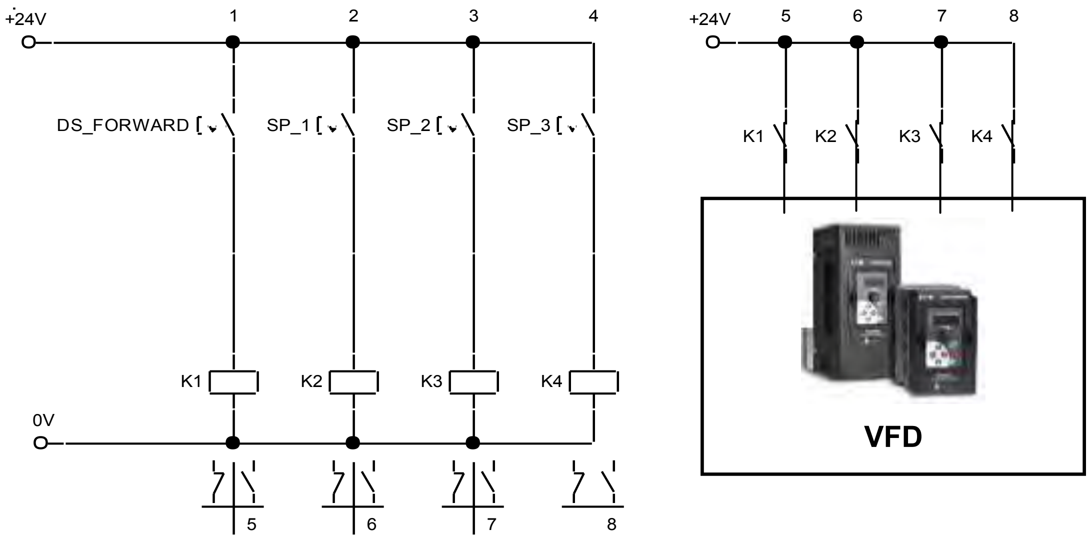

Gambar 4-11 Program Kontrol Kecepatan Motor dalam Ladder Diagram

**TUGAS :**

Untuk kasus 3 (Mesin Bubut) buatlah program kontrol dengan PLC menggunakan *Pushbutton switch* sebagai input Multi-Speed (Dua kecepatan dan tiga kecepatan).

## B. Implementasi Diagram Kontrol VFD berbasis relai

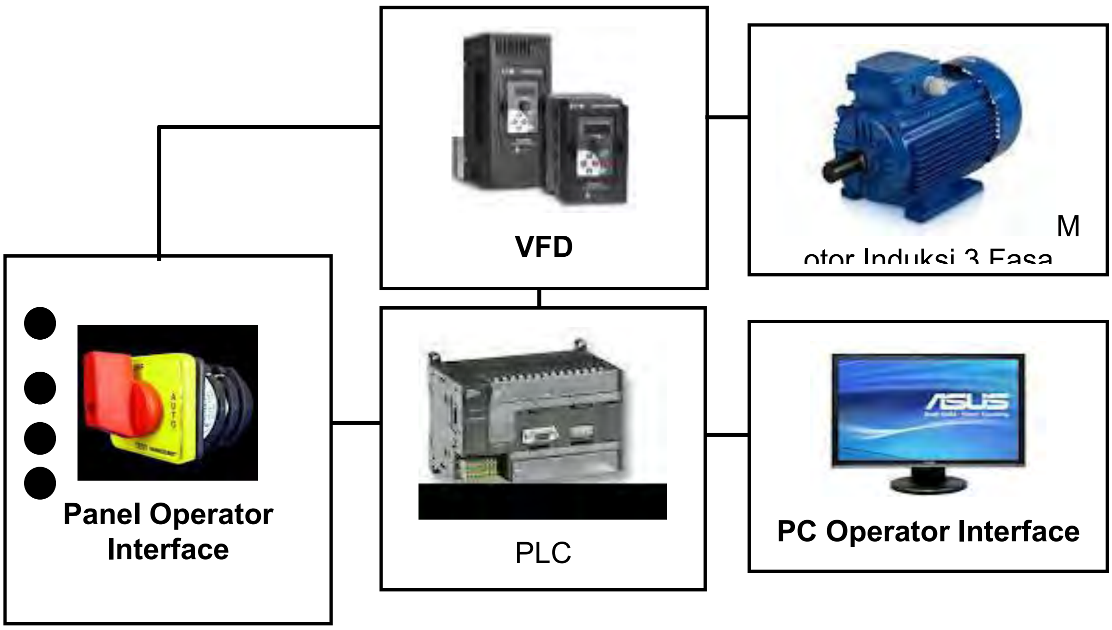
**Manual-Operation Speed**




Gambar 4-12. Diagram Kontrol Kecepatan Motor.

Keterangan : K1 = Kontak relai Forward
K2 = Kontak relai Speed 1
K3 = Kontak relai Speed 2
K4 = Kontak relai Speed 3

**Blok Diagram Kontrol Keseluruhan adalah :**




Gambar 4-13. Blok Diagram Kontrol

Untuk mempermudah monitoring dan pengendalian proses kontrol VFD secara keseluruhan dan real time maka dimungkinkan dilakukan pengendalian jarak jauh (*remote control*) oleh operator pada control room melalui Man Machine Interface atau operator interface. Saat ini untuk visualisasi operator interface, serta untuk keperluan monitoring dan pengontrolan *real-time data* berbasis SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) dilengkapi dengan software berbasis visual dengan istilah *Human Machine Interface* (HMI) yang dikembangkan oleh banyak vendor yang berbeda, sehingga akan mempermudah operator untuk melakukan *remote control*.

# DAFTAR PUSTAKA

Thomas E. Kissell, ***Modern Industrial/Electrical Motor Controls : Operation, Installation, and Troubleshooting***, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1990.

.............................. , ***Automation Solution Guide***, Schneider Electric Indonesia, Manual 2007

Brown, Mark, ***Practical Troubleshooting Electrical Equipment and Control Circuit***, Newnes Linacre, Jordan Hill, Oxford, 2005

.................................., ***Electronic Motor Starters and Drives****.* Moeller Wiring Manual, 2008

User's Manual, ***ALTIVAR 18 Adjustable Speed Driver Controllers for Asynchronous Motors****,* Schneider Electric, 2000.

Greg C.Stone, ed. ***Electrical Insulation for Rotating Machine***. A John Willey & Sons, Inc Publication USA 2004.

Muhammad H.Rashid, ***Power Electronics Handbook***, Academic Pres, New York USA 2001.

Timothy L.Skvarenina. ***The Power Electronics Handbook Industrial Electronics Series***. CRC Press, Washington DC 2002.

User's Manual, ***LS Variable Frequency Drives SV-iG5A***, LS Industrial System, Chonan Chungnam Korea 2003.